

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS
DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CINVESTAV
IPN
ADQUISICION
DE LIBROS**

UNIDAD QUERÉTARO

**Efecto de la radiación de microondas en las propiedades
físico – químicas y elásticas del grano de trigo**

Tesis que presenta

Zorba Josué Hernández Estrada

para obtener el Grado de

Maestro en Ciencias

en la Especialidad de

Materiales



**CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y
DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL
INSTITUTO POLITÉCNICO
NACIONAL**

**COORDINACIÓN GENERAL DE
SERVICIOS BIBLIOGRÁFICOS**

Director de la Tesis: Dr. Juan de Dios Figueroa Cárdenas

Santiago de Querétaro, Qro.

Enero de 2010

CLASSE: TA404.2 H47 2010
ADQUIS 551 147
FE: 13- Enero 2011
PROCE: Tesis - 2010

ID: 167563-1001

AGRADECIMIENTOS

A CINVESTAV Querétaro, por la formación e instalaciones brindadas.

Al CONACyT por la beca proporcionada para la continuación de mis estudios.

Al CIMMyT y en especial al laboratorio de calidad de cereales por las facilidades brindadas para este presente trabajo.

Al campo experimental del Bajío del INIFAP, por proporcionarnos el trigo para su análisis.

Contenido

Contenido	i
Lista de Figuras	v
Lista de Tablas	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Introducción	1
1.1. Importancia del trigo	1
1.1.1. Mundial	1
1.1.2. Nacional	2
1.2. Clasificación del trigo por su tipo de gluten (México)	5
Justificación	6
Objetivos	7
General	7
Específicos	7
Desarrollo	8
3.1. Aspectos teóricos	8
3.1.1. El Trigo	8
3.1.1.1. Descripción botánica	8
3.1.1.2. Variedades	8
3.1.1.3. Estructura del trigo	9
3.1.1.3.1. El Salvado	10
3.1.1.3.2. El germen	11
3.1.1.3.3. El Endospermo	11
3.1.1.4. Composición Química	13
3.1.1.4.1. Almidón (C ₁₂ H ₂₀ O ₁₀)	13
3.1.1.4.1.1. Amilosa	14

3.1.1.4.1.2. Amilopectina	15
3.1.1.4.2. Proteínas	16
3.1.1.4.2.1. Clasificación de proteínas de cereales por solubilidad	16
3.1.1.4.3. Enzimas	18
3.1.1.4.4. Celulosa.....	19
3.1.1.4.5. Hemicelulosas y pentosanos	20
3.1.1.4.6. Azúcares.....	20
3.1.1.4.7. Lípidos	21
3.1.1.5. El gluten y su importancia en la calidad del pan	21
3.1.1.6. Molienda del trigo.....	23
3.1.1.6.1. Productos de la molturación o molienda.....	25
3.1.1.7 Panificación.....	26
3.1.1.7.1. Sistemas de panificación	26
3.1.1.7.2. Aditivos	27
3.1.1.7.3. Procesamiento.....	28
3.1.1.7.3.1. Amasado	28
3.1.1.7.3.2. Fermentación.....	29
3.1.1.7.3.3. Crecimiento u horneado	30
3.1.2. Radiación electromagnética	32
3.1.2.1. Efecto de la radiación electromagnética sobre la materia.....	33
3.1.2.2. Las microondas	34
3.1.2.2.1. Uso de la energía electromagnética en los alimentos	35
3.1.3. Reología	36
3.1.3.1 Módulo de elasticidad (grano).....	38
3.1.3.2. Alveógrafo de Chopin.....	43

3.1.3.3. Viscosidad	43
3.1.4. Sedimentación	45
3.2. Materiales y Métodos.....	46
3.2.1. Muestras de trigo.....	46
3.2.2. Irradiación con microondas	47
3.2.3. Análisis físico	48
3.2.3.1. Módulo de elasticidad	48
3.2.3.2. Peso hectolítrico	49
3.2.3.3. Proteína y PSI en grano	49
3.2.3.4. Humedad	50
3.2.4. Molienda.....	50
3.2.5. Análisis químico	51
3.2.5.1. Proteína de la harina	51
3.2.5.2 Sedimentación	52
3.2.6. Análisis reológicos de las harinas	52
3.2.6.1. Alveograma.....	52
3.2.6.2. Viscosidad	55
3.2.6.3. Calidad panadera	55
3.2.7 Reflectancia difusa de infrarrojo por transformada de Fourier	57
3.2.8. Análisis estadístico.....	57
4. Resultados y discusión.....	58
4.1. Propiedades físicas y químicas	58
4.2. Efecto de la radiación de microondas en la temperatura del material	60
4.3. Efecto de la irradiación de microondas en las propiedades mecánicas del grano.	61
4.4. Propiedades reológicas de la masa.....	67

4.4.1. Viscosidad	67
4.4.2. Evaluación de la calidad reológica de las masas de trigo irradiado con microondas utilizando el alveógrafo de Chopin	68
4.5. Calidad panadera	74
4.6. Correlaciones entre las variables analizadas	78
Conclusiones	80
Perspectivas	83
Bibliografía	85

Lista de Figuras

Figura 1. Producción mundial de trigo. (a) Principales países productores en 2007. (b) Dinámica de la producción.....	1
Figura 2. Producción Nacional de Trigo. (a) Principales Estados productores en México en 2008. (b) Dinámica de la producción.....	2
Figura 3. Oferta de trigo en grano en México.....	3
Figura 4. Distribución de la producción de trigo por tipo de gluten.....	4
Figura 5. (a) Corte longitudinal y transversal del grano. (b) Partes del grano	9
Figura 6. Esquema de una fracción de la molécula de amilosa.....	15
Figura 7. Esquema de una parte de la molécula de amilopectina.....	15
Figura 8. Variación alélica en G-APM en tres locus Glu-A1, Glu-B1 y Glu-D1.....	18
Figura 9. Espectro electromagnético.....	33
Figura 10. Efecto de diferentes tipos de radiación sobre la materia.....	34
Figura 11. Relación entre el módulo de elasticidad de trigo en grano e índice de dureza PSI, 7.5% (blanco) y 16.5% (color) de humedad.....	39
Figura 12. Ciclo esquemático de compresión.....	41
Figura 13. Esquema de las dimensiones del grano de trigo (a) vista aérea (b) sección transversal.....	42
Figura 14. Representación esquemática de los cambios de los gránulos de almidón en relación a la viscosidad.....	44
Figura 15. De izquierda a derecha balanza volumétrica (peso hectolítrico), infralyzer 300 (dureza y proteína en grano), Steinlite (humedad).....	50
Figura 16. Molino Buhler (cortesía CIMMyT).....	51
Figura 17. Alveógrafo de Chopin (cortesía CIMMyT)	52
Figura 18. Esquema de trazado de alveograma: a) posición de partida, b) resistencia de la masa (tenacidad), c) deformación de la masa en una burbuja (extensibilidad) d) rotura de la burbuja (fin del ensayo).....	53
Figura 19. Diagrama esquemático de un alveograma.....	54
Figura 20. Panificación, de izquierda a derecha: amasado, horneado y producto final.....	56

Figura 21. Efecto de la irradiación de microondas en el volumen de sedimentación de las variedades de trigo analizadas.....	60
Figura 22 Variación del módulo de elasticidad con respecto a la altura del grano.	62
Figura 23. Efecto de la irradiación de microondas en el módulo de elasticidad en trigo (variedad Monarca.).....	63
Figura 24 Variación del módulo de elasticidad con respecto al tiempo de irradiación de microondas.....	66
Figura 25. Variación del módulo de elasticidad en diferentes tamaños de grano por efecto de la irradiación de microondas.	66
Figura 26. Efecto del tiempo de irradiación con microondas sobre la tenacidad de la masa.	70
Figura 27 Cambio en la relación P/L de las diferentes variedades de trigo a diferentes tiempo de irradiación de microondas	72
Figura 28. Alveogramas tipo de trigo variedad Monarca con los diferentes tiempos de irradiación de microondas.....	73
Figura 29. Detalles de los cambios en amida I y II de las proteínas por efecto de la irradiación con microondas.....	74
Figura 30. Perfil típico esperado del cambio de volumen de pan, a diferentes tiempos de irradiación de microondas (variedad Monarca).	77
Figura 31. Efecto de la irradiación de microondas sobre el volumen de pan de las variedades de trigo analizadas.	77

Lista de Tablas

Tabla 1. Clasificación de las especies de trigo por número de cromosomas	8
Tabla 2. Constituyentes de las partes del grano de trigo	13
Tabla 3. Amilasas del trigo (Belitz y Grosch 1997).....	19
Tabla 4. Harinas de trigo (Belitz y Grosch 1997).....	25
Tabla 5. Tiempos y temperaturas de cocción de algunos panes.....	30
Tabla 6. Compuestos aromáticos de importancia en el pan blanco	32
Tabla 7 Características de las variedades de trigo analizadas.....	46
Tabla 8. Ingredientes para panificación método AACC 10-09.....	56
Tabla 9. Propiedades físicas y químicas en diferentes variedades de trigo	58
Tabla 10. Temperaturas y humedades alcanzadas al aplicar la radiación de microondas.....	61
Tabla 11. Propiedades mecánicas de las variedades analizadas	64
Tabla 12. Efecto del tiempo de irradiación con microondas en las propiedades mecánicas de los trigos evaluados ($v=0.01\text{mm/s}$ 0.5mm).....	65
Tabla 13. Resultados del RVA por variedad (harina humedad base 14%)	67
Tabla 14. Cambios en la viscosidad por efecto de la irradiación con microondas en los trigos analizados.....	68
Tabla 15. Parámetros reológicos de las masas de las variedades de trigo analizadas.....	69
Tabla 16. Promedio general del efecto de irradiación con microondas evaluados con el alveógrafo de Chopin.....	70
Tabla 17. Calidad panadera de las variedades de trigo analizadas	75
Tabla 18. Color y calidad de la miga del pan de las variedades analizadas.	75
Tabla 19. Cambios en la calidad panadera por efecto de la irradiación con microondas en las variedades analizadas.....	76
Tabla 20. Correlaciones de Pearson entre las variables respuesta de muestras de trigo.	79

Resumen

En la presente investigación se exploró una nueva alternativa para mejorar la calidad panadera del trigo, utilizando tiempos cortos (5, 10 y 15 segundos) de irradiación con microondas, para modificar las propiedades físico – químicas y elásticas del grano de trigo, así como su efecto en la calidad.

Se encontró que los granos de trigo pequeños (<3.0mm) son menos elásticos y de menor calidad que los grandes, siendo estos a los que se le pueden mejorar su calidad con la irradiación de microondas. Se observó en la mayoría de los tipos de trigo un incremento significativo de la tenacidad con el incremento del tiempo de irradiación especialmente a 15 segundos. La reflectancia difusa en el infrarrojo por transformada de Fourier mostró algunos cambios inducidos a la proteína del trigo por efecto de la irradiación de microondas. Estos cambios se dan principalmente en el rango de 1650-1658 cm^{-1} de amida I y 1545-1547 cm^{-1} de amida II, han sido asignados principalmente a la alfa-hélice que en este caso específico a 15 segundos de irradiación alcanza un máximo nivel con posibles beneficios en la calidad. El efecto del tratamiento de microondas mostró tendencias importantes a incrementar el volumen del pan. Los alveogramas mostraron incremento en la tenacidad de las masas de los trigos irradiados con microondas, durante 15 y 10 segundos. Aunque la extensibilidad presentó una tendencia a disminuir, esto último no es estadísticamente significativo. Los mayores volúmenes de pan se presentan en los tiempos de exposición a microondas de 10 y 15 segundos.

Palabras claves: trigo, microondas, panificación, reología, tenacidad.

Abstract

The present research uses a new approach to improve the breadmaking quality of wheat by using microwave energy in short periods of time (5, 10 y 15 sec) to modify the physico-chemical properties of the wheat kernel as well as the quality. It was found that the small kernel sizes (<3.0mm) were soft and less elastic and with relatively low quality than the bigger kernels and those may improve their quality with the microwave irradiation. In most of the wheat types were an increment of the tenacity with the increment of the irradiation time of 15 sec. The diffuse reflectance by using DRIFT's showed some changes induced mainly in the wheat protein by the effect of microwave irradiation. Those changes may be localized mainly in the range of 1650-1658 cm^{-1} of amide I and 1545-1547 cm^{-1} of amide II that had been assigned mainly to alpha-helix and in this work the irradiation time of 15 sec reach a maximum level with possible beneficial effect on quality.

The alveograms showed a increment of dough tenacity of wheat irradiated with microwave for 15 to 10 seconds, although the extensibility has a tendency to decrease, this was not significant. The best performance of loaf volume and quality were found for microwave irradiation time of 10 and 15 seconds.

Keywords: wheat, microwave, baking, rheology, tenacity.

Introducción

1.1. Importancia del trigo

1.1.1. Mundial

A nivel mundial, el trigo es el cereal más utilizado en la alimentación humana; su importancia en la dieta del hombre reside en: su alto valor energético, su contenido proteico, que es superior al del maíz y el arroz, aunado a su capacidad de procesamiento, única entre los cereales, colocándolo entre los que más se utilizan como materia prima para una gran diversidad de alimentos procesados y varios productos no alimentarios. En 2005, de acuerdo a FAO, lo anterior justifica y explica la importancia del trigo tanto en el abasto, como en la economía y la generación de empleos, a nivel mundial (Peña *et al.* 2007).

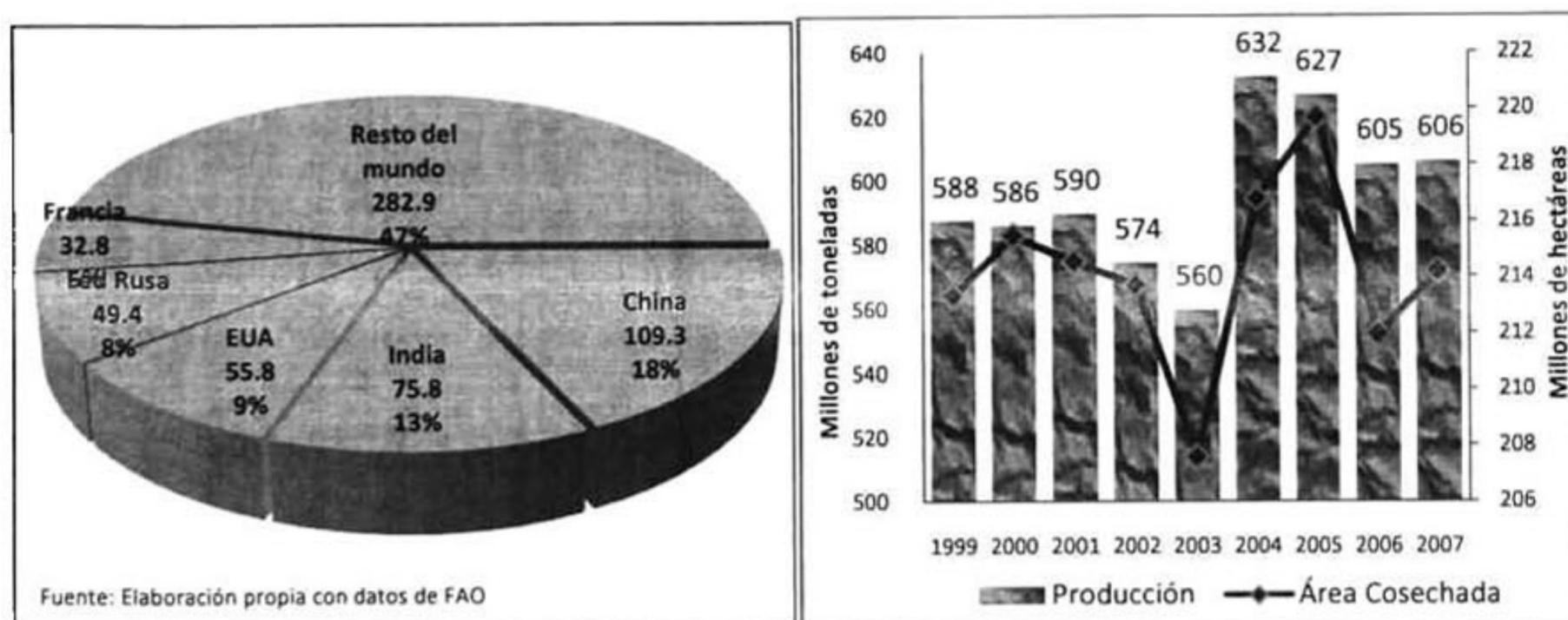


Figura 1. Producción mundial de trigo. (a) Principales países productores en 2007. (b) Dinámica de la producción (FAO 2009).

En la Figura 1 (a) se observa que China fue el país con mayor producción de trigo en el 2007 con 109.3 millones de toneladas de trigo en grano, seguido de la India, Estados Unidos, la Federación Rusa y Francia que aportaron el 13, 9, 8 y 5% respectivamente; y que entre los 5 países más productores cosecharon el 53% del total de trigo. Además, la tendencia de la producción mundial (b) es a

incrementarse, ya que de 1999 al 2007, se tuvo un aumento de 18 millones de toneladas, que representa un 3.1%.

1.1.2. Nacional

En México el trigo es la tercera fuente de nutrientes de bajo costo en la dieta del mexicano (después del maíz y el frijol), sobre todo en poblaciones rurales y urbanas de bajos recursos. Además, su cultivo, procesamiento y consumo generan una importante derrama económica y un gran número de empleos en varios sectores y actividades de la cadena Sistema Producto Trigo. En el país se cultiva trigo harinero (*Triticum aestivum*), del cual después de la molienda se obtiene harina, que se utiliza en la elaboración de panes, tortillas, galletas y repostería; y trigo cristalino (*Triticum durum*), del cual se obtiene sémolas, para pastas alimenticias: espaguetis, sopas secas, etc. (Peña et al. 2007).

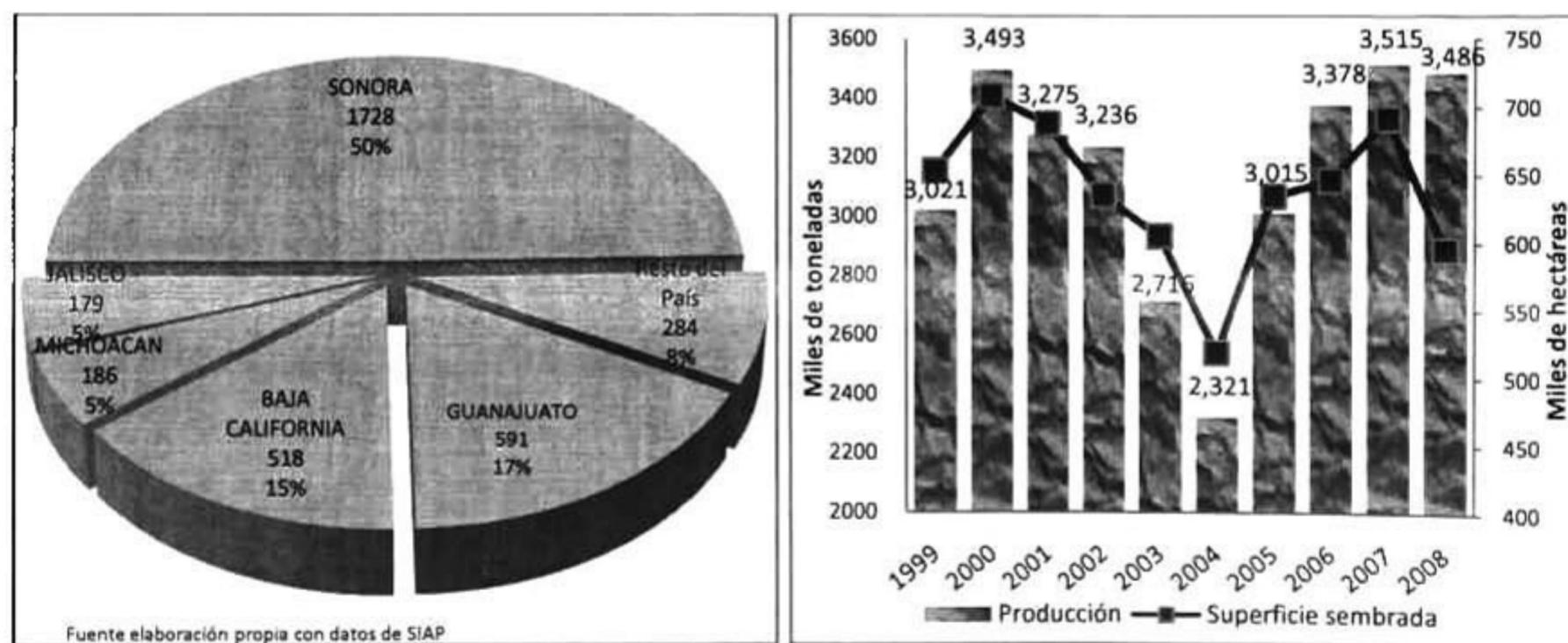


Figura 2. Producción Nacional de Trigo. (a) Principales Estados productores en México en 2008. (b) Dinámica de la producción.

México de acuerdo a la Figura 2 (a), tiene su producción de trigo muy localizada, ya que 3 Estados aportan el 82% de la producción nacional; siendo Sonora el estado con mayor producción, en el año 2008 produjo 1,728 mil toneladas de trigo, seguido de Guanajuato y Baja California los cuales aportaron 591 y 518 mil

toneladas de este cereal, respectivamente. Se observa además (b), que del año 1999 a 2008, la tendencia de la producción es a incrementarse, aumentando en este periodo en 15.4%. La disminución de los años 2003 y 2004, se debió a la baja de los precios del trigo en 2001 y 2002, presentándose el menor precio promedio del medio rural en el año 2002, el cual fue de \$1,215 por tonelada de grano.

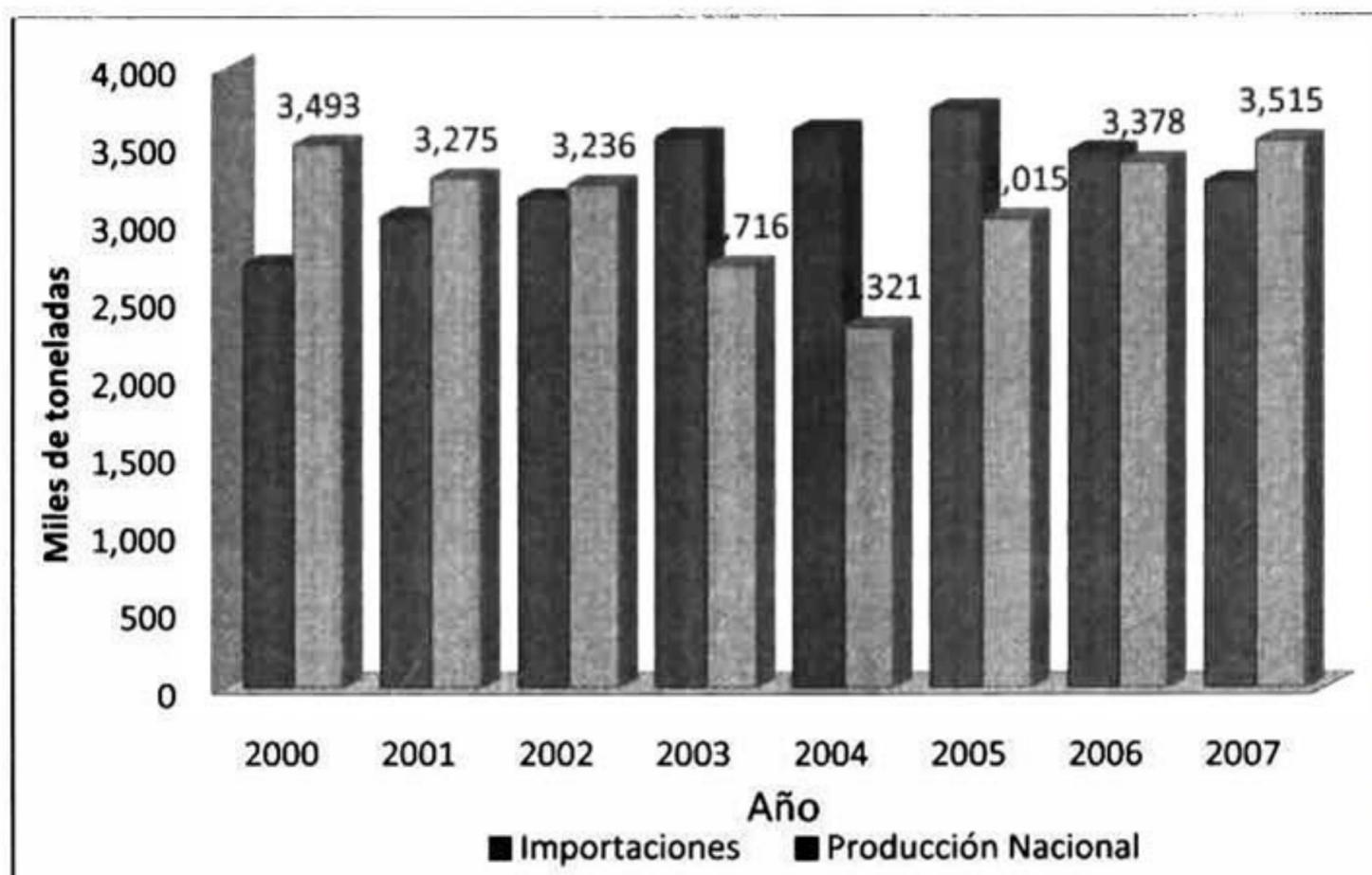


Figura 3. Oferta de trigo en grano en México.

En cuanto a la oferta nacional de trigo, en la Figura 3, se observa la alta dependencia de las importaciones, siendo para el periodo de los años 2000 a 2007 de 26.44 millones de toneladas de trigo en grano con relación a los 24.95 millones de toneladas de producción nacional.

Aunado al déficit de producción de trigo, por problemas de resistencia a plagas y enfermedades, las variedades más adaptadas, y por lo tanto las que más se cosechan en el país, son las de tipo suaves y extensibles (53.2%), y cristalinos (44.4%), como se observa en la Figura 4.

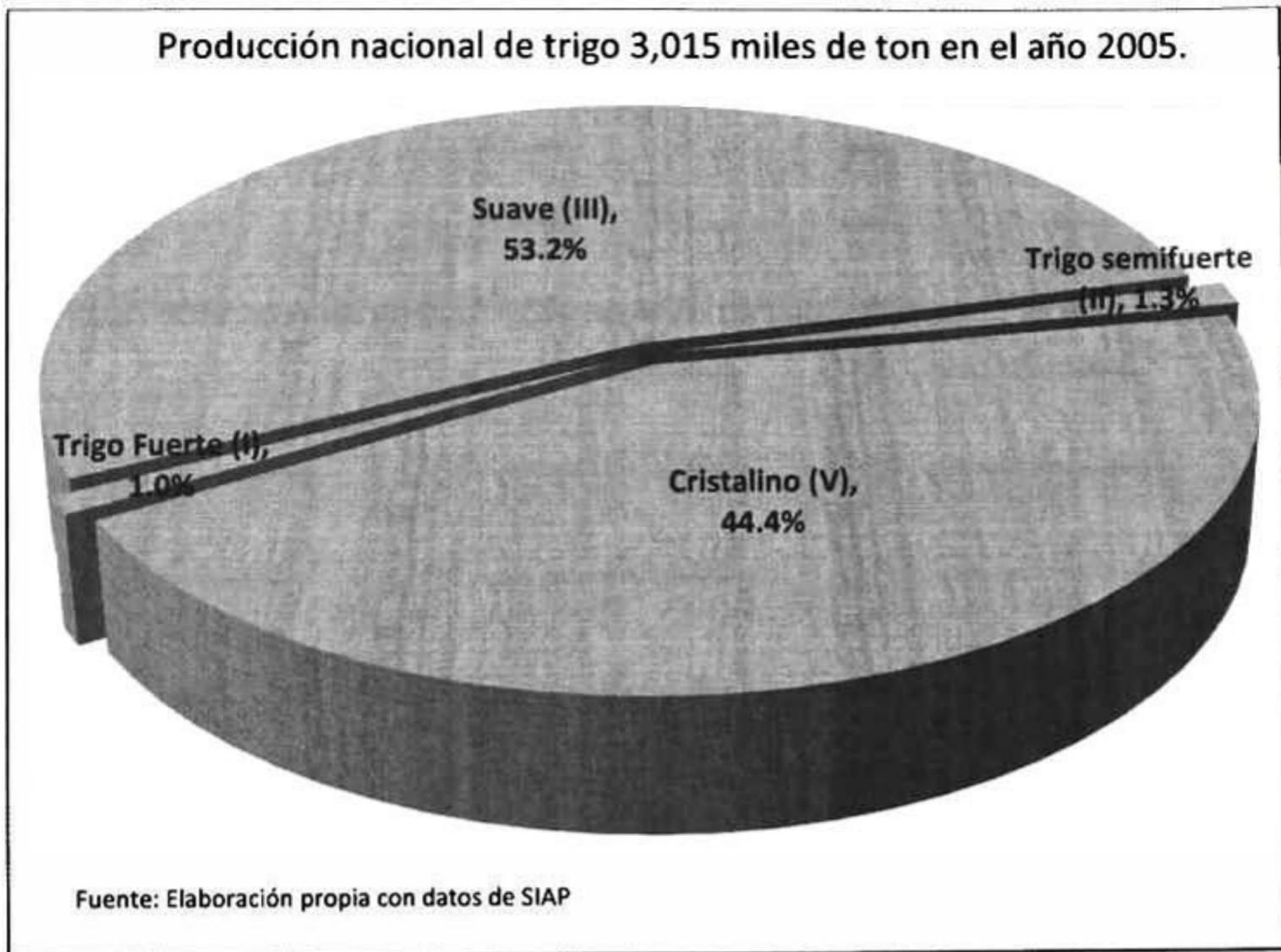


Figura 4. Distribución de la producción de trigo por tipo de gluten.

La Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo (CANIMOLT) reportó que para 2007, se realizó una molienda de 5,183 miles de toneladas, de las cuales 3,198 fueron de trigos fuertes; 1,371 de trigo suave; y 614 miles de toneladas fueron de trigo cristalino. De esta producción, se obtuvo 2,399 miles de toneladas de harina para pan; 1,028 para galletas, tortillas y coberturas; y 442 miles de toneladas de sémola para pastas (CANIMOLT 2008).

Como se menciona anteriormente, México es dependiente de las importaciones de trigo, especialmente en los trigos utilizados para la panificación (De-la-O et al. 2006), ya que sólo un 2% de la producción nacional, puede utilizarse para este uso directamente. Lo que hace necesario nuevas formas de mejoramiento de la calidad panadera del trigo, ya que el mejoramiento genético es un proceso el cual puede durar de 4 a 5 años para la liberación de una nueva raza o variedad.

1.2. Clasificación del trigo por su tipo de gluten (México).

De acuerdo a la norma mexicana NMX-FF-036-1996, el trigo se clasifica en: Dos clases: los panificables que corresponden a la especie *Triticum aestivum* L. y que comprenden los grupos 1, 2, 3 y 4 y los trigos no panificables que corresponden al *Triticum durum* Desf., comprendiendo el grupo 5.

Clases de trigo panificable (*Triticum aestivum* L). Es el trigo que se utiliza en la elaboración de harinas para pan, galletas, tortillas y otros, en el cual se identifican cuatro grupos (grupo 1, 2, 3 y 4), de acuerdo a las características de calidad del gluten.

Grupo 1 (trigos de gluten fuerte). Es el que posee las características de fuerza y propiedades visco-elásticas aptas para la industria mecanizada de la panificación y para mezclas con trigos suaves.

Grupo 2 (trigos de gluten medio fuerte). Es el que posee las características de fuerza y propiedades visco-elásticas aptas para la industria artesanal y semi-mecanizada de pan, así como para mezclas con trigos suaves.

Grupo 3 (trigos suaves de gluten débil). Es el que posee Las características de fuerza y propiedades visco-elásticas aptas para la industria galletera y para la elaboración de otros productos.

Grupo 4 (trigos de gluten tenaz). Es el que posee poca fuerza y valores de tenacidad altos, aptos para mezclas y en la producción de harinas con diferente potencial de utilización en la industria pastelera, galletera y en otros productos.

Clase de trigo no panificable (*Triticum durum* Desf.). Es el trigo apto para la elaboración de pastas y otros productos.

Grupo 5 (trigos cristalinos). Son aptos para la producción de semolinas, utilizada en la elaboración de pastas y otros productos (SECOFI 1996).

Es importante remarcar que son los trigos de gluten fuerte y semifuerte los más demandados por la industria del pan, razón por la cual son los mejores pagados.

Justificación

Debido a la gran demanda de trigo panadero en México, respecto a la cantidad cosechada de este cereal, aunado a la poca especialización del material genético producido en el país, el presente trabajo pretende explorar una nueva alternativa para incrementar la calidad panadera de los trigos mexicanos, especialmente en los que producen gluten suave, a través de la aplicación de energía del espectro electromagnético, específicamente en la región de las microondas. Con base a lo anterior, se realizaron irradiaciones de trigo en grano y en harina para estudiar los cambios físico – químicos, reológicos y en la calidad panadera, esperando encontrar diferencias en las propiedades elásticas del endospermo, que están relacionadas con la calidad del trigo.

Objetivos

General

Evaluar el efecto de la irradiación de microondas sobre las propiedades físico – químicas y visco-elásticas del trigo en grano y en harina, así como su relación con la funcionalidad del mismo.

Específicos

Aplicar radiación de microondas a 4 variedades de trigo en grano y 1 variedad en harina.

Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los granos.

Evaluar las propiedades químicas de la harina.

Evaluar la calidad reológica de la masa obtenida de trigo tratado con microondas, utilizando los parámetros del alveógrafo Chopin.

Evaluar la calidad panadera de los materiales seleccionados.

Desarrollo

3.1. Aspectos teóricos

3.1.1. El Trigo

3.1.1.1. Descripción botánica

La planta de trigo pertenece a la familia de las gramíneas (*gramineae*), la cual incluye a los cereales, que son las gramíneas que producen frutos secos con una sola semilla. Estos frutos se llaman cariósides, comúnmente conocidos como granos, y se desarrollan dentro de las cubiertas florales que, en realidad, son hojas modificadas, llamadas glumas y forman parte de la paja. En el trigo, arroz, centeno, maíz, sorgo y mijo perlado, el grano se desprende fácilmente mediante la trilla; por ello, se dice que estos granos son desnudos (Hoseney 1991).

3.1.1.2. Variedades

Tabla 1. Clasificación de las especies de trigo por número de cromosomas

Núm. de cromosomas	Nombre latino	Nombre común
7 Diploides	<i>T. aegilpoides</i>	Escaña silvestre
	<i>T. monococcum</i>	Escaña menor
14 Tetraploides	<i>T. dicoccoides</i>	Almidonero silvestre
	<i>T. dicoccum</i>	Almidonero
	<i>T. durum</i>	Trigo duro o siciliano
	<i>T. persicum</i>	Trigo de Persia
	<i>T. turgidum</i>	Trigo Redondillo
	<i>T. polonicum</i>	Trigo polaco
21 Hexaploides	<i>T. timophevi</i>	Carece de nombre
	<i>T. aestivum o vulgare</i>	Trigo candeal
	<i>T. sphaerococcum</i>	Trigo indio o enano
	<i>T. compactum</i>	Trigo racimoso
	<i>T. spelta</i>	Escanda, escaña mayor
	<i>T. macha</i>	Trigo macha

La textura (dureza) y color de los granos de trigo, varían en gran medida. La textura depende las fuerzas de cohesión en el endospermo. El color, generalmente blanco o rojo (aunque también puede ser púrpura), dependiendo de la concentración y tipo de pigmentos otorgados por la genética de la variedad (Hoseney 1991).

Tecnológicamente, el grano de trigo, está constituido por tres grandes porciones: que en promedio son el endospermo que ocupa el 82%, el salvado que abarca el 15%, y el germen conforma el 3% (Kent 1987). Las partes estructurales del grano de trigo se pueden observar en la Figura 5.

3.1.1.3.1. El Salvado

Compuesto principalmente por el pericarpio y la testa, se componen en gran parte de celulosa y hemicelulosa, y de una sustancia que no es carbohidrato, llamada lignina. Del exterior hacia al interior disminuyen las cantidades de materia fibrosa en estas capas y aumentan las de proteína y sales minerales. Tanto el pericarpio como la testa presentan un alto contenido de ácido fítico, y solo una pequeña proporción de las distintas vitaminas existentes en el grano (Aykroyd y Doughty 1970).

Se ha estimado que el pericarpio comprende el 5% del peso del grano y está formado por un 6% de proteína, 2% de cenizas, 20% de celulosa y 0.5% de grasa, y el resto de pentosanos (Hoseney 1991), que se encuentran como células intermedias, largas e intermedias.

La cubierta de la semilla o testa está firmemente unida a las células tubulares por su lado exterior y a la epidermis nucelar por el lado interior.

3.1.1.3.2. El germen

Constituido por el embrión y el escutelo representan el 3% del grano. El embrión contiene, alrededor de 30% de proteínas solubles, lleva incorporados carbohidratos hidrosolubles, principalmente sacarosa y rafinosa, que representan un 20% del embrión y le dan a este un sabor dulce. Tiamina y otras vitaminas del grupo B se hallan presentes en grandes cantidades. El contenido de grasa es de 30%. El aceite del germen tiene una gran proporción de ácidos grasos no saturados, y es una de las fuentes más ricas en vitamina E (260 mg / 100 g).

El escutelo presenta una composición semejante a la del embrión, aunque muy rico en tiamina (12 y 23 mg/ 100 g), hallándose en mayores cantidades en trigos duros con relación a los trigos suaves, es también rico en fósforo, encontrándose este en un 69% como fitato (Aykroyd y Doughty 1970).

3.1.1.3.3. El Endospermo

El endospermo feculento, excluyendo la capa aleurona, está constituido por tres tipos de células: periféricas, alargadas y centrales, estas varían su tamaño y forma, de acuerdo a su ubicación en el grano. Las células periféricas, generalmente incluidas dentro de la capa de aleurona, generalmente son pequeñas, con diámetros iguales en todas direcciones o ligeramente alargados hacia el centro del grano. Rodeadas por las células periféricas se encuentran varias filas de células alargadas, de unos 150 x 150 μm . Las células centrales quedan en el interior de las células alargadas; su tamaño y forma son más irregulares que las demás (Hoseney 1991).

Las paredes celulares del endospermo están formadas por pentosanos, otras hemicelulosas, y β -glucanos. Su espesor varía con la posición, siendo más gruesas cerca de la capa aleurona. Las paredes celulares gruesas contienen

mayor cantidad de hemicelulosa, que ayudan para la absorción de agua, en contraparte las paredes delgadas presentan menor cantidad de absorción de agua.

Una diferencia entre el trigo duro y el trigo suave es en el punto de fractura al quebrar el grano. En el caso de los trigos fuertes, la fractura se produce por la pared celular, y las células se quedan dentro de la aleurona. Para los trigos suaves la ruptura se produce a través del contenido celular, que evidencia que en los trigos fuertes el contenido celular se encuentra más fuertemente ligado; en la molienda de los trigos fuertes el contenido celular también se fracciona (Hoseney 1991).

El contenido y paredes celulares de las células del endospermo, constituyen la harina. Las células están repletas de granos de almidón incluidos en una matriz proteica. Donde la mayor parte de la proteína es gluten, o proteínas de reserva del trigo. Cuando madura el trigo, se sintetiza el gluten en los cuerpos proteicos, los que se van comprimiendo unos contra otros formando una matriz (Hoseney 1991).

En los trigos fuertes la proteína cubre la superficie del almidón, y el enlace entre ellos es fuerte. En los trigos suaves la proteína no cubre toda la superficie del almidón y la unión proteína almidón se rompe fácilmente. En los trigos cristalinos sí se aplica suficiente fuerza transversal se rompen los granos de almidón, y no los enlaces proteína almidón. Este enlace proteína-almidón no ha podido ser muy estudiado. En estudios con técnicas de inmunofluorescencia, se ha demostrado que el trigo fuerte tiene una proteína hidrosoluble, de la cual carecen los trigos suaves (Hoseney 1991).

El endospermo del trigo varía en textura (dureza) y en aspecto (vitreos), en general, los trigos duros ricos en proteína, tienden a ser vitreos, y los trigos suaves y pobres en proteína, tienden a ser opacos. Aunque el origen de sus cualidades es diferente, y no siempre se presentan juntas. La dureza es producida por la fuerza de la unión proteína-almidón en el endospermo, la cual es controlada

genéticamente. la transparencia (vitrosidad), es el resultado de la escasez de cavidades con aire en el grano, aunque no está claro, generalmente se puede asociar con la cantidad y calidad de proteína (Hoseney 1991).

3.1.1.4. Composición Química

En la tabla 2 se observa la composición de las diferentes estructuras del grano de trigo, en la que el almidón es el principal componente del grano, y que se encuentran principalmente en el endospermo; le siguen en importancia las proteínas, las cuales están en mayor proporción en el germen y la capa aleurona.

Tabla 2. Constituyentes de las partes del grano de trigo (Aykroyd y Doughty 1970).

Componente/ Estructura	Almidón	Azúcares reductores	Pentosanos y otros CHO's	Celulosa	Proteínas crudas	Lípidos	Cenizas	Contenido energético
	-							kcal/100g
	%							
Grano entero	58.5	2.0	6.6	2.3	12.0	1.8	1.8	310
Pericarpio	0.0	0.0	34.5	38.0	7.5	0.0	5.0	175
Testa y capa hialina	0.0	0.0	50.5	11.0	15.5	0.0	8.0	175
Capa aleurona	0.0	0.0	38.5	3.5	24.0	8.0	11.0	244
Endospermo externo	62.7	1.6	1.4	0.3	16.0	2.2	0.8	345
Endospermo interno	71.7	1.6	1.4	0.3	7.9	1.6	0.5	344
Embrión y escutelo	0.0	26.0	6.5	2.0	26.0	10.0	4.5	350

3.1.1.4.1. Almidón (C₁₂H₂₀O₁₀)

La energía en los granos se almacena principalmente como gránulos de almidón, formados en los amiloplastos. Es el principal constituyente de los cereales, incluido el trigo, como se observa (Thomas y Atwell 1997) en la tabla 2, que el 58% del grano es almidón; el cual está formado por dos grandes moléculas: amilopectina y amilosa, en una proporción (4 a 1) (Aykroyd y Doughty 1970).

El almidón está compuesto fundamentalmente por polímeros de α -D-glucosa (Thomas y Atwell 1997), y está en discusión si los demás azúcares encontrados en cantidades mínimas, son parte del almidón o son contaminantes no eliminados en el proceso de extracción. Contiene también pequeñas cantidades de grasas, generalmente lípidos polares. Las sustancias minerales en el almidón son principalmente fósforo y nitrógeno (Hoseney 1991).

El gránulo de almidón es una estructura altamente organizada, que cuando se observan bajo la luz polarizada de un microscopio, aparece una cruz típica de birrefringencia, denominada cruz de malta, la cual indica que existe un alto grado de orden molecular dentro del gránulo. Esta organización está determinada por los factores genéticos que gobiernan la biosíntesis del almidón (Murúa 2008).

El agua es un componente integral de la estructura del gránulo de almidón, y participa en la hidratación que se presenta en la gelatinización de éste, así como en el subsecuente hinchamiento y disolución del gránulo (Murúa 2008).

3.1.1.4.1.1. Amilosa

Polímero lineal, que se observa en la Figura 6, formado por α -D-glucosa unida en α -1,4; su peso molecular es del orden de 250,000 (1,500 unidades de glucosa anhidra), aunque varía mucho de acuerdo a la especie, variedad, estado de madurez, entre otros, de plantas que lo produzca. La naturaleza lineal y de gran longitud de la amilosa, le confiere propiedades únicas, por ejemplo: su capacidad de formar complejos con yodo, alcoholes o ácidos orgánicos y la tendencia a asociarse consigo misma facilitando la cristalización o retrogradación (Hoseney 1991).

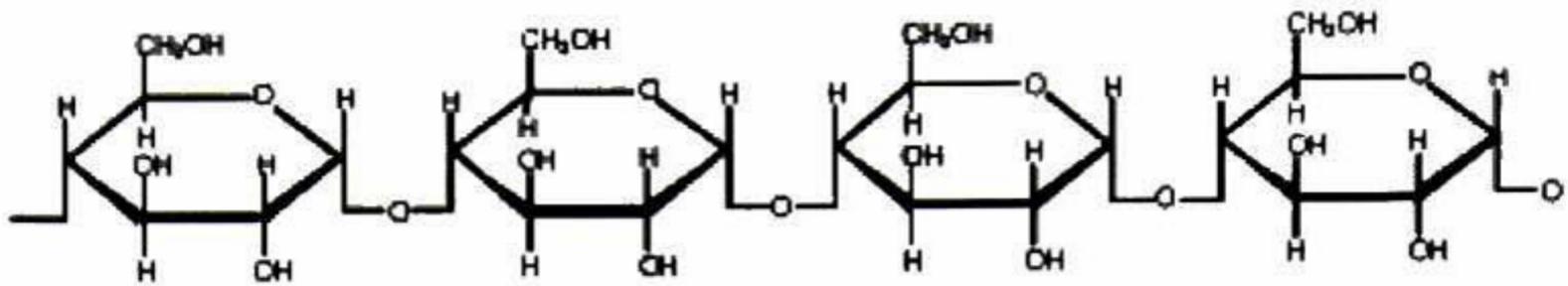


Figura 6. Esquema de una fracción de la molécula de amilosa.

3.1.1.4.1.2. Amilopectina

Al igual que la amilosa, está formada por α -D-glucosa, concatenada principalmente por enlaces α -1,4; ramificada con 4 a 5% de enlaces α -1,6, como se observa en la Figura 7. Este nivel de ramificación indica que, en promedio, la cadena unitaria de amilopectina tiene solamente de 20 a 25 unidades de glucosa. El peso molecular de una molécula es del orden de 10^8 (595,238 unidades de glucosa). La amilopectina está ramificada al azar y tiene tres tipos de cadena:

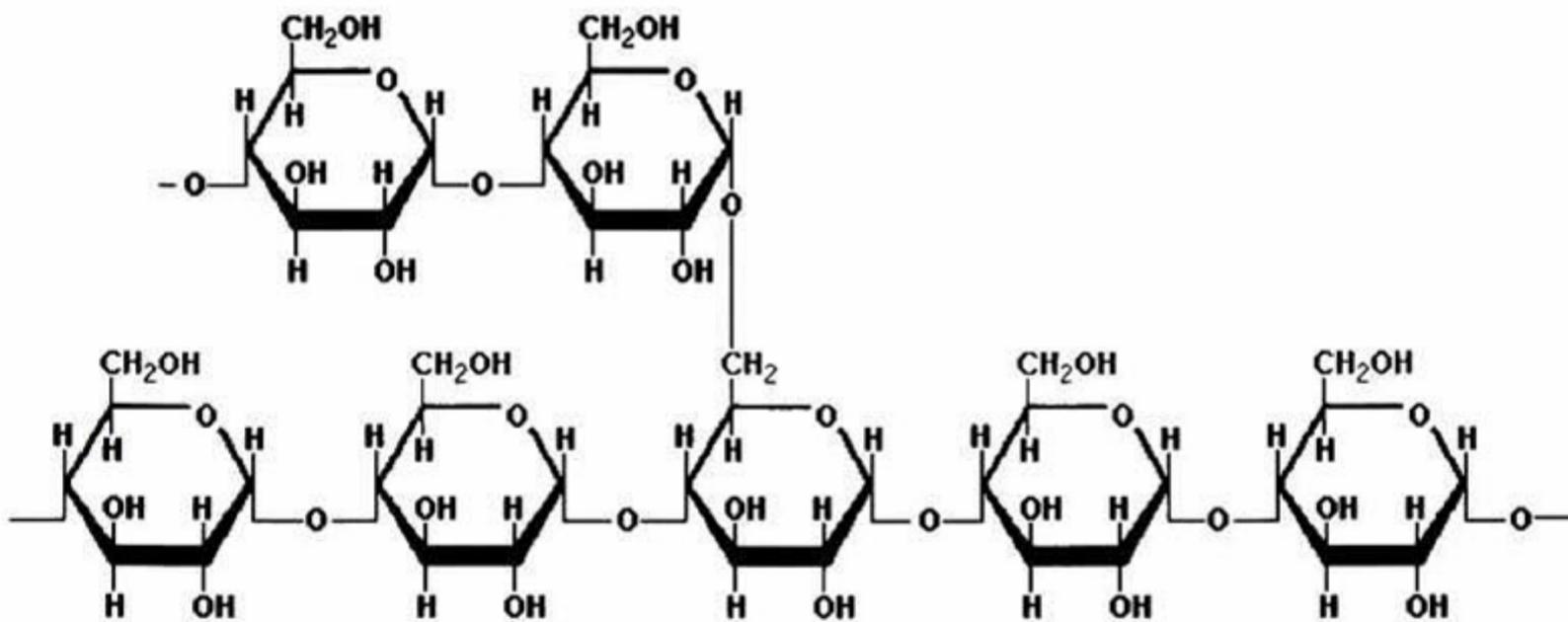


Figura 7. Esquema de una parte de la molécula de amilopectina.

- A. compuesta por glucosas con enlaces α -1,4;
- B. compuestas por glucosas con enlaces α -1,4 y α -1,6, y
- C. igual que las cadenas tipo B más un grupo reductor.

El trigo, centeno y la cebada tienen dos tamaños de almidón: los grandes y lenticulares con un diámetro de 25 a 40 μm ; y los pequeños y esféricos con un tamaño medio de 5 a 10 μm (Hoseney 1991).

3.1.1.4.2. Proteínas

Las proteínas, son polímeros de aminoácidos unidos por enlaces peptídicos. La estructura primaria, la secuencia de aminoácidos, es la primera diferenciación. Esta cadena de aminoácidos puede curvarse de diferentes formas, siendo principalmente los grupos sulfhídrido de la cisteína, los que forman el enlace disulfuro (-S-S-), el cual curva la cadena de aminoácidos, generando la estructura secundaria de la proteína. La estructura terciaria (o tridimensional) de las proteínas, define la solubilidad de las proteínas; es determinada por diferente tipos de enlaces (generalmente débiles), con un gran número de estos, creando una resistencia fuerte en conjunto. Ejemplo de estos son el enlace iónico, el enlace de hidrógeno, y el enlace hidrófobico (Hoseney 1991).

3.1.1.4.2.1. Clasificación de proteínas de cereales por solubilidad

En 1907, T.B. Osborne separó las proteínas del trigo en cuatro fracciones, de acuerdo a su solubilidad, extrayendo sucesivamente de una muestra de harina, teniéndose, lo siguiente (Hoseney 1991, Kent-Jones y Amos 1956):

- Albuminas, solubles en agua.
- Globulinas, solubles en solución salina
- Prolaminas (gliadinas), solubles en alcohol
- Glutelinas (gluteninas), solubles en ácidos o bases diluidas, las cuales pueden seguirse fraccionando en: subunidades de alto peso molecular (G-APM) y de bajo peso molecular (G-BPM).

Las dos primeras son de poca importancia por la cantidad en la que se encuentran, sin embargo tienen un alto valor nutricional. La albumina constituye un 0.3% del trigo y la globulina de 0.6 a 0.7% (Kent-Jones y Amos 1956).

Las gliadinas y gluteninas se encuentran en una proporción de 2:3, respectivamente, siendo las más importantes, ya que ambas proteínas más agua y con el amasado forman el gluten. El gluten es el responsable que la harina de trigo con agua forme una masa fuerte y cohesiva, capaz de retener gas y rendir por cocción un producto esponjoso. Las gliadinas (es el disolvente) fijan las gluteninas para que no sean arrastradas por el agua, son las responsables de la viscosidad y que la masa sea pegajosa. Las gluteninas transfieren solidez y elasticidad a la masa (Belitz y Grosch 1997).

Las proteínas del gluten están codificadas por nueve loci génicos complejos de los brazos largos (BL) y cortos (BC) de los cromosomas del genoma del trigo. Las G-BPM junto con las gluteninas de alto peso molecular (G-APM) representan el 80 y 20% del total de las gluteninas. En la Figura 8, se puede observar como se distribuyen las proteínas al separarlas por electroforesis (Belitz y Grosch 1997).

Las gluteninas pueden ser fraccionadas en 4 clases de subunidades, de acuerdo a su movilidad electroforética en SDS-PAGE después de reducir sus enlaces disulfuro, y se encuentran en las regiones A, B, C y D. En la región A se encuentran las de un peso molecular de 80,000 a 120,000 Da, que son las gluteninas de alto peso molecular. En el grupo B (42,000 a 51,000 Da), C (30,000 a 40,000 Da) y D son las gluteninas de bajo peso molecular, siendo las del grupo D las que guardan una alta relación con las gliadinas (Maucher 2008).

Las gliadinas del trigo constituyen un amplio grupo de proteínas monoméricas, con propiedades físico-químicas similares (Colombo et al. 2008), y se clasifican en cuatro tipos de acuerdo a su movilidad electroforética en geles de poliacrilamida en α , β , γ (mayor movilidad) y ω (menor movilidad) (Martínez et al. 2007).

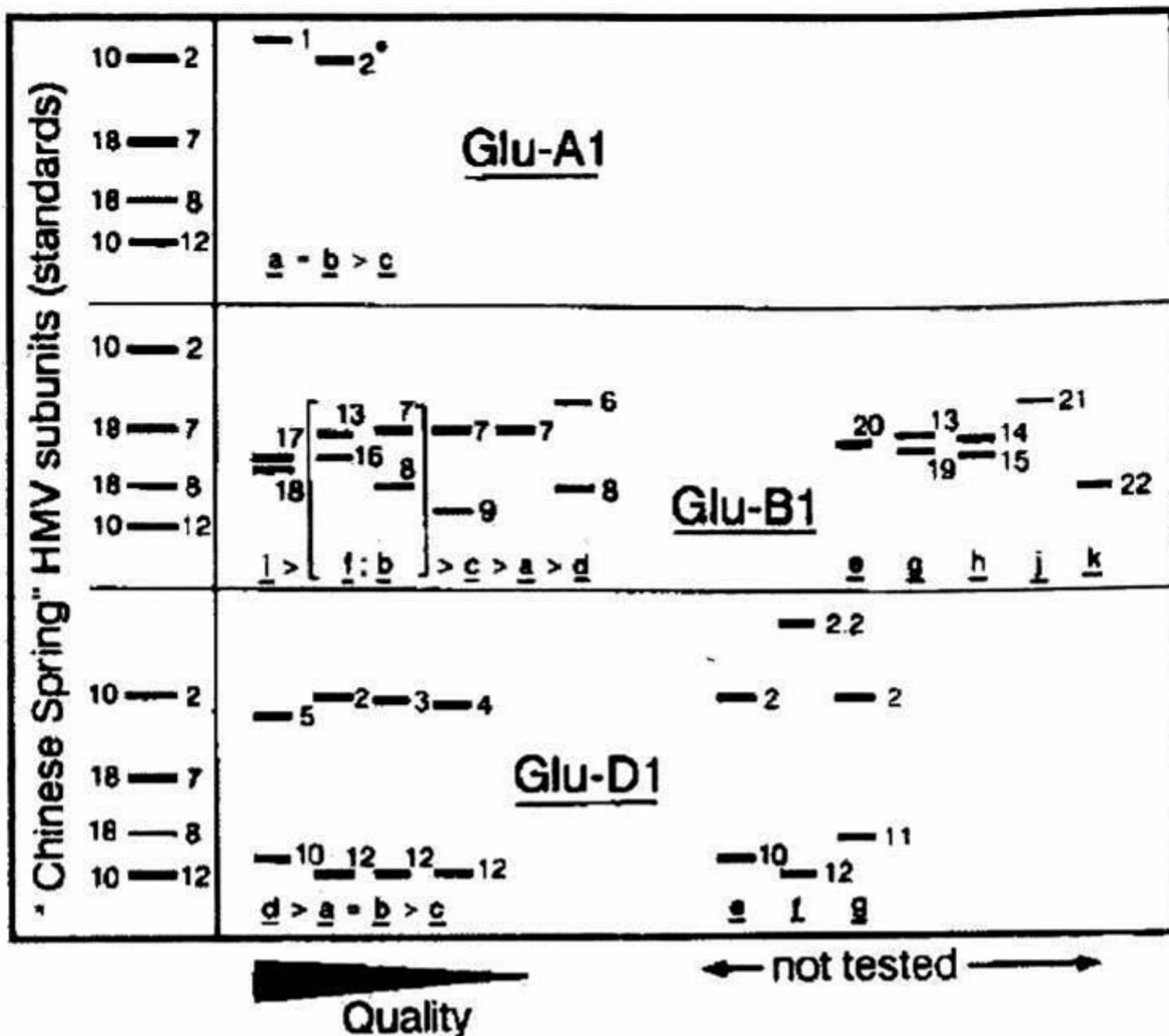


Figura 8. Variación alélica en G-APM en tres locus Glu-A1, Glu-B1 y Glu-D1 (Payne et al. 1984). En el lado izquierdo aparece el patrón genético de "Chinese Spring" para comparación.

Como se mencionó, las gluteninas de alto peso molecular son importantes, ya que ejercen mayor influencia sobre la fuerza del gluten, y determinan en gran medida la elasticidad y calidad del mismo; las G-BPM tienen mayor efecto en la extensibilidad del gluten (De-la-O et al. 2006). Por su parte las gliadinas están relacionadas directamente con la viscosidad (Martínez et al. 2007); por lo que todas las proteínas del gluten ejercen un papel importante en la calidad.

3.1.1.4.3. Enzimas

Las enzimas más importantes del trigo son las diastásicas, que tienen como función degradar el almidón principalmente a maltosa. Aún cuando estas enzimas

se encuentran en el embrión del grano de trigo, se encuentran siempre en cualquier clase de harina en mayor o menor proporción (Kent-Jones y Amos 1956).

En todos los cereales existen α y β amilasas, las cuales son de interés porque la acción de la levadura requiere que la actividad de ambas sea óptima (ver Tabla 3). En el grano maduro, la actividad de la α -amilasa alcanza un mínimo, aumentando durante la germinación (Belitz y Grosch 1997).

Además el trigo tiene: proteinasas (ácidas), que participan en la suavidad del gluten durante la fabricación del pan; lipooxigenasas, que forman 9-hidroxi-peróxido a partir del ácido linoléico (en los trigos cristalinos la enzima pertenece al grupo I, por lo tanto co-óxida a los carotenoides lentamente, y ocasiona la pérdida de color amarillo de las pastas); glutatión-deshidrogenasa, cataliza la oxidación del glutatión en presencia de ácido dehidroascórbico como aceptor de hidrógeno; las polifenoloxidasas, se encuentran en las capas externas del grano, y en las harinas integrales son las responsables del pardeamiento. Se encuentran presentes también las fitasas, peroxidadasas y catalasas (Belitz y Grosch 1997).

Tabla 3. Amilasas del trigo (Belitz y Grosch 1997).

Enzima/característica	α -amilasa I	α -amilasa II	β -amilasa
pH óptimo	3.6 – 5.75	5.5 – 5.7	5.4 -6.2
Masa molar	37 ^a	21 ^a	64.2 ^b
Punto isoeléctrico	4.65 – 5.11	6.05 – 6.20	4.1 – 4.9

^a Cromatografía en gel. ^b Ultra-centrifugación.

3.1.1.4.4. Celulosa

Polisacárido estructural, formado por D-glucosa unida por enlaces β -1,4. Polímero muy largo y no ramificado, que se asocia fuertemente consigo mismo, en su estado nativo es cristalino; encontrándose asociado a la lignina y otros polisacáridos no feculentos. El pericarpio de los cereales es muy rico en celulosa

(hasta 30%). En el endospermo se puede encontrar en concentraciones de 0.3% o menos, que probablemente, sea ausencia de celulosa en éste (Aykroyd y Doughty 1970).

3.1.1.4.5. Hemicelulosas y pentosanos

Son polisacáridos vegetales no feculentos y no celulósicos, se cree que forman las paredes celulares, siendo el material de unión que mantiene juntas las células. Químicamente son muy diversos, desde un azúcar simple, como el que se encuentra en los β -glucanos, hasta los polímeros que pueden contener pentosas, hexosas, proteínas y fenoles. Una heterogeneidad importante entre los pentosanos es su solubilidad en agua. Los hay solubles e insolubles (Belitz y Grosch 1997).

Los pentosanos insolubles en agua, constituyen un 2.4% del endospermo del trigo; se hinchan intensamente en agua, influyendo positivamente en las propiedades reológicas de la masa.

Los pentosanos solubles en agua, presentan similitudes a los insolubles, aunque son más ramificados. La cadena central, suele estar formada con unidades de D-xilopiranosil unidas en β -1,4 con cadenas laterales de L-arabinosa (Hoseney 1991). Estos polisacáridos pueden absorber de 15 a 20 veces más de agua que las proteínas hidrosolubles, formando disoluciones altamente viscosas. Cuando se adicionan a la harina de trigo mejoran sustancialmente el volumen de pan y la corteza, aunque provocan que el envejecimiento del pan sea más rápido (Belitz y Grosch 1997).

3.1.1.4.6. Azúcares

El trigo tiene concentraciones relativamente bajas de mono, di y trisacáridos, así como otros azúcares de bajo peso molecular. Aunque en medida que se produce la degradación del almidón sus niveles aumentan, sobre todo en la preparación de

la masa, estos son importantes fuentes de alimento para la levadura durante el crecimiento de la masa, a cargo de las levaduras (Belitz y Grosch 1997).

3.1.1.4.7. Lípidos

El grano de trigo pesa de 30 a 42 mg y contiene un 0.92 a 1.24 µg de lípidos, de los cuales: 70% son polares, 20% de glicolípidos y 10% de fosfolípidos. El germen y la capa aleurona son los más ricos en triglicéridos, presentes como esferosomas, predominando en el endospermo fosfo y glicolípidos. La harina de trigo tiene 1.5 – 2.5% de lípidos, predominando entre sus ácidos grasos el ácido linoléico. Los lípidos en la harina se encuentran ligados al almidón en un 25%.

En los lípidos unidos al almidón predominan los triglicéridos y los digalactosil-diacilglicéridos, en tanto las grasas no ligadas al almidón los constituyentes principales son los lisofosfátidos en los cuales el residuo acilo está situado generalmente en la posición 1 (Hoseney 1991).

Cuando se amasa la harina los glicolípidos se unen completamente al gluten, en tanto los otros lípidos lo hacen sólo en un 70 - 80%. La magnitud de fijación de los triglicéridos depende del trabajo efectuado sobre la masa (Hoseney 1991).

3.1.1.5. El gluten y su importancia en la calidad del pan

El gluten puede ser definido como el material proteico cohesivo y viscoelástico, producto del aislamiento del almidón de la harina de trigo (Day *et al.* 2006).

El estudio del gluten de trigo conlleva generalmente a diversos problemas, debido a que está formado por una mezcla compleja de componentes y a sus inusuales propiedades de solubilidad y su tendencia a formar redes poliméricas extensibles (Colombo *et al.* 2008).

La propiedad única del trigo para hacer pan está determinada en gran medida por las propiedades de las proteínas de almacenamiento, las cuales están clasificadas en gluteninas y gliadinas basado en la extracción y la solubilidad del método de Osborne (Shewry *et al.* 1986). Las proteínas del gluten, determinan la viscoelasticidad en la masa y el pan (Ewart 1977, Greenwood y Ewart 1975, Kasarda *et al.* 1976). Las gluteninas confieren elasticidad a la masa de pan mientras que las gliadinas son viscosas y se les atribuye la extensibilidad (Payne *et al.* 1984, Shewry *et al.* 1986).

Cuando las gluteninas se tratan con un agente reductor como el mercaptoetanol, se disocia en varias subunidades que se clasificaron en G-APM y G-BPM (Payne *et al.* 1984). Las gluteninas son de gran importancia en la explicación de la variación que se produce en las propiedades reológicas y la panificación. Subunidades de gluteninas de alto peso molecular y una subunidad glutenina de bajo peso molecular constituyen los llamados polímeros de gluteninas, que están entre las moléculas más grandes en la naturaleza, con pesos moleculares en el orden de 1 hasta 5 millones con una amplia distribución (Southan y MacRitchie 1999).

Aunque aún no se sabe con certeza cómo las proteínas del gluten interactúan para formar una masa fuerte, se pueden relacionar varios factores.

La composición de aminoácidos, las proteínas del gluten son muy ricas en ácido glutámico (35%), que se encuentra en forma de amida, la glutamida, y no como ácido libre, resultando, una prácticamente nula carga negativa, por lo que las proteínas del gluten no migran con la hidrólisis ácida.

Las proteínas del gluten son pobres en aminoácidos básicos, por su bajo contenido de lisina. Propiciando solo bajo nivel de cargas positivas, deduciéndose que el gluten tiene una baja densidad de carga, teniendo una baja repulsión entre

proteínas, por lo que las cadenas proteicas pueden interactuar fácilmente entre ellas (Hoseney 1991).

Un buen contenido de prolina en las proteínas (14%). El grupo amino, de este aminoácido, está implicado en la estructura de anillo, ya que los enlaces peptídicos de la prolina no son flexibles, resultando una estructura rígida de la cadena proteica donde esté presente la prolina sea difícil de formar la estructura de α -hélice. Esto no significa que las proteínas del gluten no tengan estructura ordenada (Hoseney 1991).

Las proteínas que forman el gluten y que determinan la calidad de la panificación, las gluteninas de alto peso molecular, son las más importantes (Espitia *et al.* 2007, Weegels *et al.* 1996).

Martínez (2007) reporta que las G-APM se asocian con la fuerza del gluten, tal como lo mencionan otros autores anteriormente, las G-BPM se asociaron con la extensibilidad de la masa y las gliadinas a la viscosidad.

Se considera que las gliadinas ω , α y γ del gluten son proteínas monoméricas, que al contrario de las subunidades de elevado y bajo peso molecular. Estas últimas encontradas en su mayor parte en forma agregada o polimerizada. En la formación de estos polímeros o agregados intervienen interacciones hidrófobas, enlaces de hidrógeno, iónicos, y puentes bisulfuro intermoleculares. (Belitz y Grosch 1997).

3.1.1.6. Molienda del trigo

El objetivo de este proceso es obtener preferentemente una harina en la cual predominen los constituyentes de las células del endospermo amiláceo. Se separa la parte externa del grano, incluyendo el germen, la capa aleurona y el salvado

En las fases previas a la molturación, los granos se analizan físicamente y químicamente, se limpian para eliminar impurezas y cuerpos extraños.

Posteriormente, los granos son acondicionados para que tengan una humedad óptima para la molienda (15 a 17%), dependiendo de la dureza del grano, en la mayoría de los casos, la adición de agua se acompaña con elevación de la temperatura para difundir mejor la humedad. Presumiblemente, el agua rompe o debilita el enlace proteína-almidón, responsable de la dureza del grano. Esta actividad tiene los objetivos siguientes (Kent-Jones y Amos 1956):

- Aumentar la tenacidad del salvado para evitar su pulverización.
- Facilitar la separación del salvado del endospermo.
- Facilitar la posterior desintegración del endospermo.
- Conseguir un cernido adecuado y fácil.

Se deberá cuidar que el trigo sea lo bastante blando para triturarlo fácilmente, aunque suficientemente fuerte para facilitar el cernido (Kent-Jones y Amos 1956).

Los granos se muelen gradualmente en un molino de rodillos, cada paso por los rodillos se acompaña por una reducción de tamaño debida a las fuerzas de presión y cizalla, seguida de la separación de la harina por diferencia de tamaño, utilizando cribas en forma de bastidores planos.

Durante la molienda del 5 a 8% de los gránulos de almidón son dañados mecánicamente, dependiendo de la dureza del grano, forma e intensidad de la molienda. Cuanto más dura sea la estructura del trigo, mayor será el daño (Belitz y Grosch 1997).

3.1.1.6.1. Productos de la molturación o molienda

Los productos finales de la molienda se clasifican técnicamente de acuerdo al diámetro de sus partículas: en mostacilla (<500 µm), sémola (200 – 500 µm), semolina (120 – 200 µm) y harina (14 – 120 µm). Las cualidades de las harinas cambian dependiendo de la variedad utilizada, y la estructura de donde proceda la harina. Las distintas harinas se separan en el molino. En la Tabla 4 se observa algunos productos de la molienda.

Tabla 4. Harinas de trigo (Belitz y Grosch 1997)

Harina	Características
Estándar	Harina comercial apropiada para diferentes productos leudados (panes esponjados)
Especial	Para productos panaderos especiales, por ejemplo: harina de trigo duro para pan tostado, harina floja para biscochos y pasteles.
Acondicionada	Harina especial, conteniendo otras materias primas (leche en polvo, huevo en polvo, azúcar, entre otros) como receta para ciertos postres.
Integral gruesa	Cereal descascarillado (sin embrión, ni glumas)
Grano triturado	Cereal descascarillado (incluido el embrión)

La composición química de la harina depende del grado de extracción; a medida que la extracción aumenta, la proporción de almidón disminuye, y aumentan los constituyentes procedentes de las capas externas. El contenido en proteína y almidón también dependen del tamaño de partícula de la harina (Belitz y Grosch 1997).

3.1.1.7. Panificación

Un factor más porque el trigo es uno de los más importantes en cuanto a superficie sembrada, aparte de su resistencia a plagas y adaptabilidad, es que a los consumidores les gustan los productos obtenidos del trigo, en especial los esponjosos, en los cuales el más popular es el pan, en sus múltiples formas, tamaños, texturas y gustos.

3.1.1.7.1. Sistemas de panificación

El pan se obtiene por muchos procedimientos diferentes, y depende de muchos factores, algunos son: la tradición, los costos, tipo de energía disponible, tipo de pan deseado, el tiempo entre la cocción y consumo; incluso la legislación, como es el caso de México en el que el peso de algunos tipos de pan están normalizados.

Un ejemplo, en México el pan blanco: son productos alimenticios cocidos por horneado de la masa fermentada, elaborada con harina de trigo, agua potable, sal yodada, azúcar, levadura, ingredientes opcionales y aditivos alimentarios permitidos por la Secretaría de Salud (SECOFI 1992).

La receta mínima para el pan, consiste básicamente, en: harina, levadura, agua y sal, si falta cualquiera de estos ingredientes, el producto no es pan. Es común encontrar otros ingredientes en las recetas, tales como: grasa, azúcar, leche o sólidos de leche, oxidantes, varias preparaciones enzimáticas (incluyendo el grano malteado), surfactantes y aditivos para evitar mohos (Hoseney 1991).

La harina, es el componente estructural básico, y la responsable de formar la masa viscoelástica que retiene el gas. La levadura, convierte los carbohidratos fermentables en dióxido de carbono y alcohol; los gases producidos proporcionan expansión, resultando en una pieza de pan esponjada. La sal, utilizada en 1-2%

del peso de la harina tiene dos funciones: saborizante y reológicas, la masa se pone más fuerte, probablemente por interferir con las cargas coulombianas de las proteínas de la masa. El agua es el disolvente, que actúa como plastificante, da el carácter viscoso, y las condiciones para que las reacciones se lleven a cabo (Hoseney 1991).

3.1.1.7.2. Aditivos

En las pequeñas panaderías tradicionales, el panadero utiliza su experiencia para compensar los cambios de calidad de las materias primas, modificando el tiempo y fuerza de amasado, el tiempo y temperatura de cocción. La industria, demanda materias primas uniformes, incluso en sus propiedades, cuando estas propiedades no son uniformes, se utilizan aditivos.

La grasa o anti aglutinante, sirve para que el pan permanezca blando y conserve la palatabilidad más tiempo, los mejores resultados se han obtenido con lípidos polares y glicolípidos, mediante la adición de lecitina bruta, mono y diacilglicerol o sus derivados, en los cuales los grupos OH están esterificados con los ácidos acético, tartárico, láctico, mono o diacetiltartárico; los triacilglicerol disminuyen el volumen de pan (Belitz y Grosch 1997). La grasa actúa como plastificante de la masa, por lo que si se aumenta la cantidad de grasa, deberá reducirse la cantidad de agua, y viceversa (Hoseney 1991).

Los oxidantes tales como el ácido ascórbico, bromato potásico, azodicarbonamida y peróxido cálcico a concentraciones de partes por millón, mejoran la fuerza de la masa dando como resultado panes con mayor volumen y textura más blanda.

La adición de malta como fuente de α -amilasa, mejora la textura del pan, generando maltosas fermentables, a partir del almidón, para que las levaduras las metabolicen.

Como fortalecedores de la masa, se utilizan otros surfactantes, los que ayudan a permitir que la masa resista efectos mecánicos en las líneas de producción, ejemplo de ellos son: estearoil lactilato sódico (SSL), mono glicéridos etoxilados (EMG), esteres del ácido diacetiltartárico con mono y di glicéridos (DATEM) y otros (Hoseney 1991).

La adición de cisteína, en forma de clorhidrato, ablanda el gluten, debido al intercambio de bisulfuros con la fracción de las gluteninas; la oposición a la extensión de la masa disminuye y la extensibilidad aumenta. Entonces, sí a las harinas con gluten fuerte se les adiciona la cantidad adecuada de cisteína, es posible obtener pieza de pan con mayor volumen (Belitz y Grosch 1997).

3.1.1.7.3. Procesamiento

El procesamiento del pan se puede dividir en tres operaciones básicas: amasado o formación de la masa, fermentación y cocción.

3.1.1.7.3.1. Amasado

El amasado se caracteriza por las siguientes fases: mezcla de ingredientes y aditivos, desarrollo de la masa y plastificación de la misma. La energía aportada, las propiedades de la masa y el volumen de cocción están interrelacionados. Para cada harina, el mayor volumen de pan se obtendrá de un óptimo amasado. Una vez que el amasado sobrepasa el máximo, la masa se hace más húmeda y empieza a pegarse en las paredes de la amasadora, y la capacidad de retención de gas disminuye (Belitz y Grosch 1997).

La masa para pan se prepara mezclando agua y harina, comúnmente en una proporción 70/30 (p/p). La absorción, que depende del tipo de harina, predetermina la mayoría de las reacciones. Una retención elevada de agua favorece la movilidad

de los constituyentes que participan en las reacciones, por ejemplo en la degradación enzimática del almidón a azúcares reductores. (Belitz y Grosch 1997)

El amasado prensa las partículas pegajosas de la harina unas contra otras y favorece la aglomeración. Las fuerzas de cizalla actúan sobre toda la estructura y la red sufre una extensión bidimensional, comenzando a formarse las películas en los puntos de ramificación. Si se sigue trabajando la masa hasta su desarrollo óptimo, se favorece la formación de películas, que ahora, junto con las fibras presentes son la estructura predominante (Hoseney 1991).

Resumiendo, las partículas de harina individuales son una matriz proteica esponjosa en las que está incluido el almidón; al adicionar agua, la matriz se vuelve pegajosa y hace que las partículas de harina estimuladas por el amasado, se adhieran formando una estructura continua. Simultáneamente la matriz proteica se estira, por la fuerzas de cizalla, formándose películas proteicas en los puntos de ramificación. De ser un amasado perfecto, el volumen de pan se verá incrementado. Si se continua amasando las películas se perforan, formándose fibras proteicas cortas e irregulares, características de una masa trabajada en exceso, y el gas escapa por las perforaciones (Hoseney 1991).

3.1.1.7.3.2. Fermentación

Las levaduras producen CO₂ y etanol que, siempre y cuando no se disuelvan en la fase acuosa de la masa, dilatarán las burbujas de aire ($10^2 - 10^5$ /mm³) formadas durante el amasado. En el pan blanco de molde, el volumen se incrementa de 5 a 7 veces, desde la masa inicial hasta el volumen de pan (Belitz y Grosch 1997).

Para que las levaduras crezcan y la masa suba, las masas esponjadas biológicamente pasan por varias etapas de fermentación. Después de una primera fermentación, la masa se divide y trabajan las piezas individuales. A una

fermentación intermedia le siguen el moldeado y la fermentación de las piezas. En el horno las piezas terminan de subir y se alcanza el volumen final (Belitz y Grosch 1997).

3.1.1.7.3.3. Crecimiento u horneado

Las condiciones de cocción dependerán del tipo de horno con el que se cuente y el tipo de pan que se pretenda obtener, en la Tabla 5 se resumen algunas de estas condiciones (Belitz y Grosch 1997).

Tabla 5. Tiempos y temperaturas de cocción de algunos panes (Belitz y Grosch 1997).

Producto	Peso (g)	Tiempo de cocción (min)	Temperatura del horno (°C)
Panecillos	45	18 -20	250 – 240
Pan de trigo libre	500	25 -30	240 – 230
Pan de trigo molde	500	35 – 40	240 – 230
Pan de trigo libre	1,000	40 -50	240 – 220

En esta etapa, la textura espumosa de la masa se transforma debido a la cocción en la textura esponjosa de la miga. Y están involucrados los siguientes procesos.

Hasta 50 °C, las levaduras producen CO₂ y etanol, al principio a velocidad creciente; simultáneamente el agua y el etanol se evaporan, lo que junto con el CO₂ liberado hace que se expandan las burbujas de gas ya existentes, aumentando el volumen del producto. Paralelamente, a temperaturas más bajas disminuye mucho la viscosidad de la masa, alcanza un mínimo de 60 °C aproximadamente y vuelve a subir bruscamente. Esta subida, ocasionada en parte por la imbibición del almidón y la salida de la amilosa ligada a ella y por otra por la desnaturalización de las proteínas. Estos procesos tienen como consecuencia que por encima de los 60 °C la tensión de dilatación de la masa y la presión de las burbujas de gas aumenten considerablemente. Las membranas ceden, se hacen permeables, de manera que el CO₂, el etanol y el vapor de agua se escapen, y el

volumen del producto vuelva a disminuir un poco, hasta que las proteínas desnaturizadas con el almidón hinchado y parcialmente gelatinizado forman un entramado estable en la miga, atravesado por los poros (Belitz y Grosch 1997).

Las membranas de pared fina, que soporten al dilatarse grandes elevaciones de temperatura sin hacerse permeables a los gases, son condición para un producto con gran volumen y unos poros finos y uniformes. Una proporción relativamente elevada de gluteninas de alto peso molecular en el gluten repercute aquí favorablemente, ya que conduce a membranas impermeables a los gases y muy expandibles (Belitz y Grosch 1997).

La magnitud del hinchamiento del almidón depende de la cantidad de agua ligada durante la preparación de la harina, sobre todo por las gliadinas, gluteninas y pentosanos. Durante la cocción, estas ponen a disposición una parte para la imbibición del almidón. Si el almidón se hincha poco, se formará una miga quebradiza y si está demasiado embebido, la miga será pegajosa (Hoseney 1991).

En la corteza del pan el almidón se gelatiniza casi completamente, si la cocción se realiza a humedad ambiental muy alta.

Antes de que las proteínas se desnaturalicen en la cocción se produce una aceleración de la catálisis enzimática. De todas las reacciones solo se conocen detalles de la degradación del almidón (Belitz y Grosch 1997).

El almidón se degrada a dextrinas mono y disacáridos a las temperaturas relativamente altas, a las que se expone la parte más externa de la masa. Las reacciones de caramelización y de pardeamiento no enzimático, tienen como consecuencia la formación de color. También se forma la corteza, cuyo espesor depende de la temperatura y tiempo de cocción (Belitz y Grosch 1997).

El aroma del pan, proporcionado por las sustancias aromáticas citadas en la Tabla 6, de acuerdo con Belitz y Grosch (1997). Dos heterociclos nitrogenados mas el furaneol y del 3-metilbutanal son los responsables de las notas aromáticas a tostado y caramelo de la corteza, mientras que en la miga participan productos de la autooxidación del ácido linoléico como el metional y diacetilo. Sí la fermentación es más prolongada en la miga aumentan el 3-metilbutanol y el 2-feniletanol formados por las levaduras (Belitz y Grosch 1997).

Tabla 6. Compuestos aromáticos de importancia en el pan blanco

Corteza	Miga
2-Acetil-1-pirrolina	(E)-2-Nonenal
2-Acetil-tetrahidropiridina	(E,E)-2,4-Decadienal
3-Metilbutanal	Trans-4,5-epoxi-(E)-2-decenal
(E)-2-Nonenal	1-Octen-3-ona
Furaneol	(Z)-2-Nonenal
	Metional
	Diacetilo

3.1.2. Radiación electromagnética

La radiación electromagnética, transporta energía a través del espacio, y también se le conoce como energía radiante. Existe varios tipos de radiación electromagnética, en orden descendente de energía: los rayos gamma, rayos X, la luz ultravioleta, la luz visible, el infrarrojo, las microondas y las ondas de radio; estos se representan en la Figura 9, llamado espectro electromagnético (Brown *et al.* 2004).

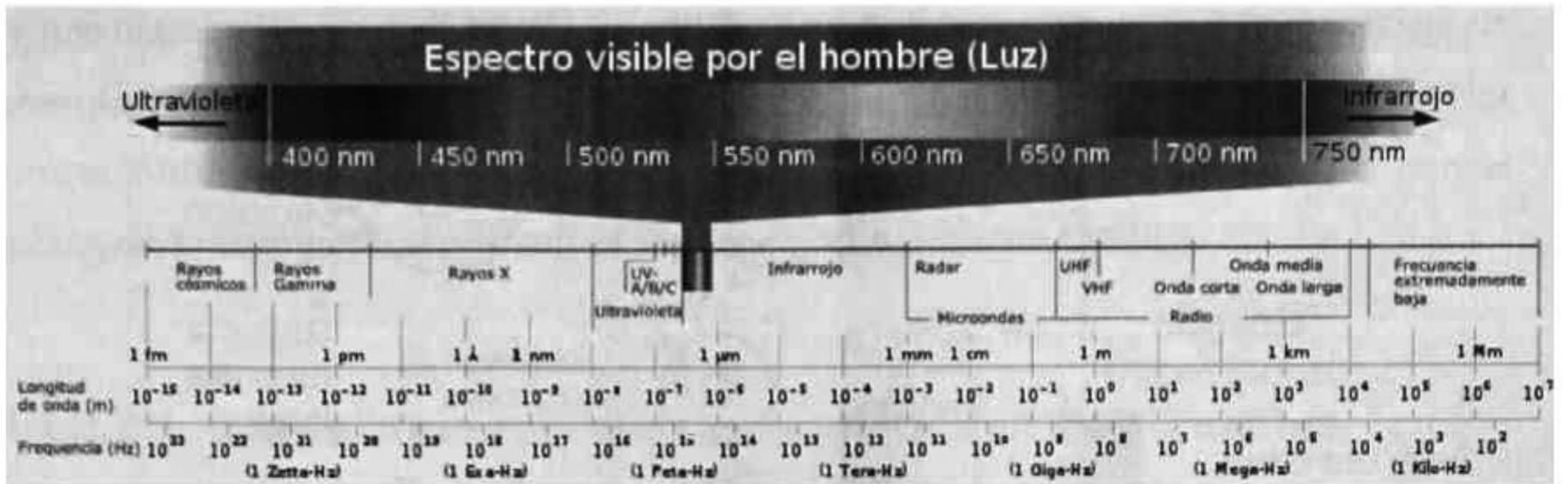


Figura 9. Espectro electromagnético

Todos los tipos de radiación electromagnética se desplazan en el vacío a la velocidad de la luz 3×10^8 m/s, además viajan en ondas, que son oscilaciones periódicas. La densidad de energía que esta radiación tiene está en función de las intensidades del campo eléctrico y magnético de la misma. En este sentido, entre menor sea la longitud de onda, mayor será la frecuencia; por lo tanto mayor la intensidad de los campos y mayor energía cuántica.

3.1.2.1. Efecto de la radiación electromagnética sobre la materia.

En la figura 7 se observa que las radiaciones con mayor energía, tienden a ser ionizantes, es decir, que pueden extraer electrones ligados a un átomo, como en el caso de los rayos X y otras radiaciones de mayor energía. La luz UV y visible, tenderán a excitar los electrones, para que estos pasen a un estado de mayor energía; la radiación infrarroja provocara excitación molecular; las microondas, que es la radiación de interés, para el presente estudio, es prácticamente transparente, o no ionizante y ocasiona rotación y torsión molecular.

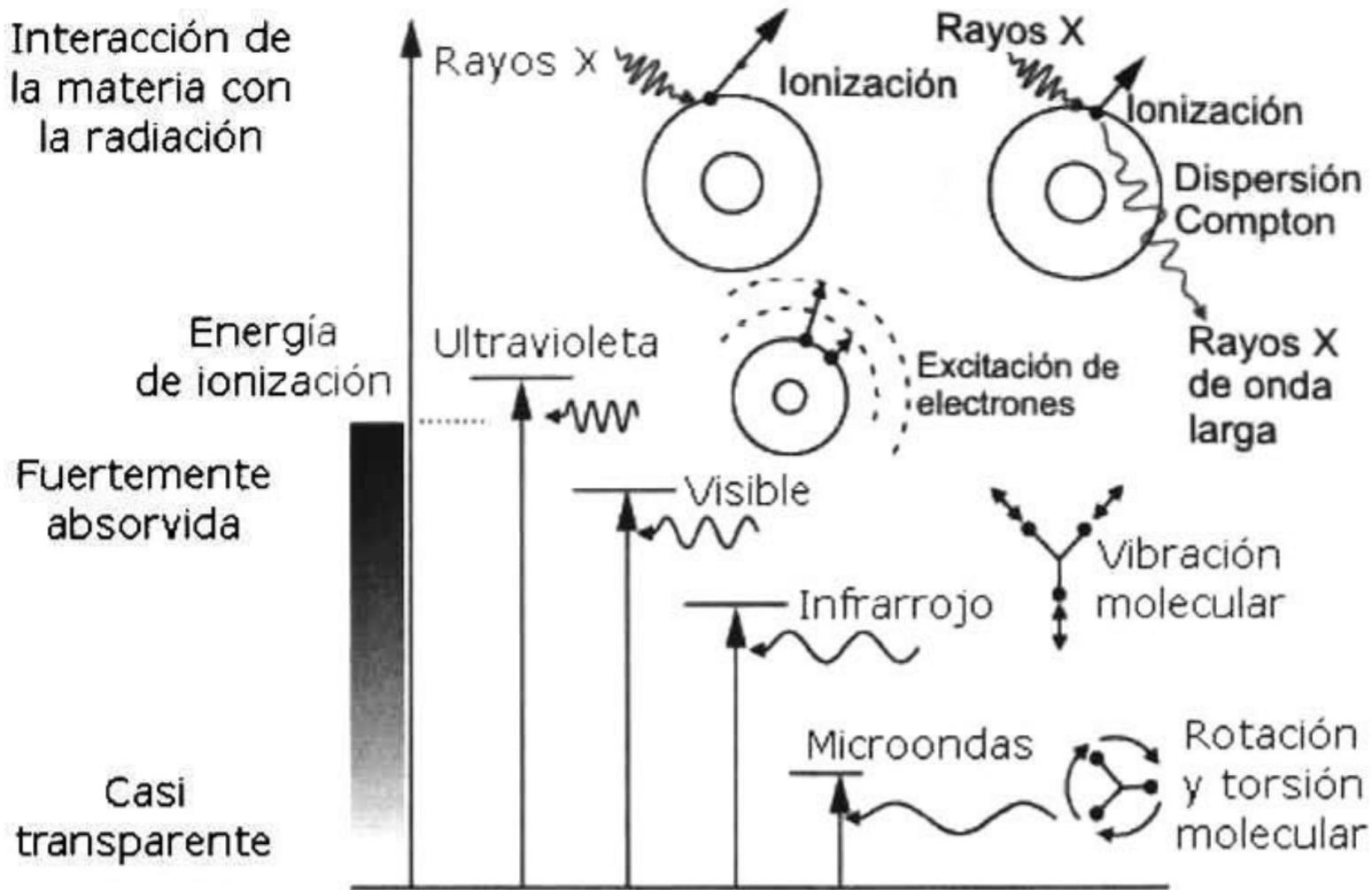


Figura 10. Efecto de diferentes tipos de radiación sobre la materia (Department of Physics and Astronomy 2006).

3.1.2.2. Las microondas

Las microondas se refieren a las ondas del espectro electromagnético que tienen una frecuencia del orden de 1,300 a 30,000 MHz. Para el caso de un horno de microondas, la frecuencia es de 2,450 Mega Hertz (Department of Physics and Astronomy 2006).

La energía de los fotones de microondas, está en el rango de 0,00001 a 0,001 eV; con esta energía, es posible separar los estados cuánticos moleculares de rotación y torsión. La interacción de las microondas con las moléculas polares, que no sean conductores metálicos, como el agua, aceites y azúcares provoca la rotación de estas moléculas, que como resultado de esa rotación se calientan (Department of Physics and Astronomy 2006).

Microondas de alta intensidad, como en un horno de microondas, al pasar de ida y vuelta a través de los alimentos millones de veces, calientan el material mediante

la producción de las rotaciones y torsiones moleculares. Dado que la cantidad de energía es un millón de veces más baja que la de rayos X, no pueden producir ionización de los tipos y características de éstos, ni los daños asociados con la radiación ionizante (Department of Physics and Astronomy 2006).

3.1.2.2.1. Uso de la energía electromagnética en los alimentos

En el área agrícola, la energía de microondas ha sido usada para secar o calentar el maíz (Nofsinger *et al.*, 1980), para acondicionar grano de trigo (MacArthur y D'Appolonia 1981). Campaña *et al.*, (1986), y Campaña *et al.*, (1993) reportaron que el secado del trigo con microondas disminuyó la capacidad de germinación afectando negativamente también las propiedades reológicas y de panificación. Las microondas se han hecho populares en los hogares para procesar las palomitas de maíz (Pondesimo *et al.*, 1990; Gökmen 2004) y para seleccionar maíz palomero en programas de mejoramiento (Mohamed *et al.*, 1993). Sin embargo, existen pocos reportes del uso de esta técnica en procesamiento de granos, tampoco se ha aprovechado su potencial para mejorar granos y semillas. En particular, es importante conocer las temperaturas límites de seguridad para evitar el daño en la semilla o el grano cuando se aplican las microondas dependiendo del efecto que se desee (López-Perea *et al.* 2008)

López Perea *et al.* (2008) evaluó el efecto de la irradiación de microondas en cebada por 4, 5, 8, 10, 15, 20 y 25 segundos de exposición, siendo la cebada expuesta a las microondas durante 4 segundos de mejor calidad industrial, incrementándose el contenido de extracto de malta. Periodos mayores a 10 segundos afectan considerablemente la germinación. La dureza del grano se ve afectada, haciendo el endospermo más suave y es con 4 segundos de radiación que la cebada presenta los menores valores de dureza. En este sentido propone a las microondas como una alternativa para modificar el endospermo y con esto aumentar la calidad de pienso y cebadas malteras.

Calentamiento por microondas ha sido evaluado para almacenamiento de maíz, disminuyendo la cuenta de hongos después del almacenamiento.

También en maíz irradiado con microondas, patentado incluso, se ha propuesto una mejora tecnológica, consistiendo en exponer los granos enteros de maíz a las microondas obteniendo como resultado un incremento en el rendimiento de masa a harina y de harina a tortilla; además de incrementar la vida de anaquel del producto final que es la tortilla (Rodríguez 2006).

Se ha reportado que para el almacenamiento de arroz, sustituyendo pesticidas por tratamiento con microondas, se disminuyen la humedad de los granos, la cantidad de ácidos grasos libres, el contenido de proteína; se incrementan la relación amilosa amilopectina y la calidad sensorial del producto cocinado (Zhao *et al.* 2007).

La radiación gamma, también ha sido evaluada como un método alternativo para preservar la harina comercial de trigo para pan, en donde no se obtuvieron cambios significativos en las propiedades físico – químicos y reológicos, sin embargo se disminuyó la carga microbiana (Agúndez-Arzivu *et al.* 2006).

3.1.3. Reología

La reología es la rama de la mecánica que estudia la deformación y el flujo de la materia. Para medir el comportamiento reológico, una deformación o esfuerzo se aplica a un material y la fuerza y tiempo empleados son medidos (o viceversa), para determinar parámetros tales como la rigidez, el módulo, la viscosidad, dureza, fuerza o resistencia del material. Los objetivos generales de medidas reológicas son: describir cuantitativamente las propiedades mecánicas, obtener información relacionada a la estructura molecular y composición del material; además de obtener información pertinente sobre su comportamiento durante algún proceso, y

sus características que definen su uso final. Estas propiedades determinan el flujo del proceso y se ven afectadas por los cambios estructurales generados durante el mismo proceso (Dobraszczyk y Morgenstern 2003).

Inicialmente esta rama de la mecánica, se desarrolló considerablemente en el campo de los polímeros sintéticos, tiene como objetivo comparar los resultados de de la mecánica de medios continuos, las teorías moleculares y simulaciones por computadora. Desgraciadamente, la aplicación de estos enfoques en los biopolímeros y los cereales es más difícil, por las razones siguientes:

Los granos de cereales son productos variables, cuya idoneidad para un determinado proceso/producto se ve afectada por el genotipo, las condiciones ambientales encontradas durante el desarrollo del grano y por último, el proceso de molienda, estas dificultades han sido reforzados por avances en el fitomejoramiento ofreciendo grandes beneficios en el comercio mundial de cereales (Kaletunç y Breslaur 2003).

Los productos de los cereales muy a menudo tienen una formulación compleja, con varios componentes (almidón, proteínas, agua, azúcares, lípidos) que interactúan y generan estructuras más o menos organizadas, el almidón está formado por dos tipos de macromoléculas, la amilosa y la amilopectina; es por lo tanto, considerado como un material multifásico y reológicamente complejo. Las masas a partir de productos de cereales son fluidos no-newtonianos, con un de alto nivel de elasticidad; muy sensibles a la temperatura, al contenido de agua, y a la composición (origen del almidón, la presencia de lípidos). Algunos de los componentes, incluso en pequeñas cantidades, como los lípidos, pueden inducir al deslizamiento, modificando totalmente las condiciones de flujo (Kaletunç y Breslaur 2003).

En adición a esta complejidad, los biopolímeros no son térmicamente estables como muchos polímeros sintéticos; comenzándose a descomponer a 200 - 220 °C,

aunque antes de este umbral, pueden ocurrir interacciones químicas, formándose enlaces covalentes cruzados intra e intermoleculares. La cinética de estas reacciones son dependientes de: la temperatura, del contenido de agua, y del tipo de procesamiento, el cual induce a cambios importantes en la estructura. Todas estas razones implican que cualquier investigación debe basarse en muestras cuyo origen biológico y las condiciones de preparación sean conocidas además de ser reproducibles. La variabilidad inducida por estos factores da lugar a una amplia gama de comportamiento durante las tres operaciones básicas en la tecnología de los cereales: la mezcla, el procesamiento de masa (incluida la formación), y horneado (Kaletunç y Breslaur 2003).

Varios estados o tipos de organización (la suspensión, la red, fusión) pueden por lo tanto encontrarse bajo muchas condiciones de flujo diferentes. Para hacer frente a la complejidad de estos cambios, herramientas reológicas empíricas se han utilizado en los laboratorios, para predecir el rendimiento de cereales y harina. Su objetivo es proporcionar información cualitativa relacionada con el proceso de adecuación. Estas pruebas, todavía se emplean extensamente, no sólo en la industria, sino también en laboratorios de investigación. Sin embargo, ningún dispositivo ha sido desarrollado para seguir las propiedades reológicas de la masa durante la cocción: Esto explica, por ejemplo, porque todos los procedimientos de prueba final para la fabricación del pan son una prueba de horneado pequeña. Esto pone de relieve que este último paso de la tecnología del pan puede revelar comportamientos inusuales, inesperados sobre la base de todas las pruebas empíricas dedicadas sólo los dos primeros pasos, la mezcla y el procesamiento de masa (Kaletunç y Breslaur 2003).

3.1.3.1 Módulo de elasticidad (grano)

Existen dos razones para medir las propiedades mecánicas de los granos de cereales: la primera es la posibilidad de clasificar el grano basado en la textura, y la segunda para el diseño de maquinaria postcosecha (Sayyah y Minaei 2004).

La dureza del grano, es una de las propiedades mecánicas, importante en el grano, y es controlada genéticamente, además de las condiciones de ambientales durante el cultivo y cosecha, la humedad que éste posea (Anjum y Walker 1991, Figueroa *et al.* 2009). Y puede ser caracterizada por cuatro tipos de esfuerzo: compresión, tensión, cizalla y flexión.

Tres mecanismos básicos del porque de la dureza del grano han sido postulados: (a) adhesión químicamente inducida entre la matriz de proteína y el gránulo de almidón (b) continuidad en la matriz de proteína y (c) la red de carga de las proteínas (Anjum y Walker 1991).

El módulo de elasticidad es una de las propiedades mecánicas de los granos, también conocido como módulo de Young, sirve para conocer la cantidad de energía (fuerza) para deformar el grano (Ponce-García *et al.* 2008), importante para el diseño de molinos; que en recientes fechas se ha iniciado a correlacionar la dureza, los grupos proteicos, su calidad industrial y el módulo de elasticidad por compresión de granos individuales, ejemplo de ellos se citan a continuación:

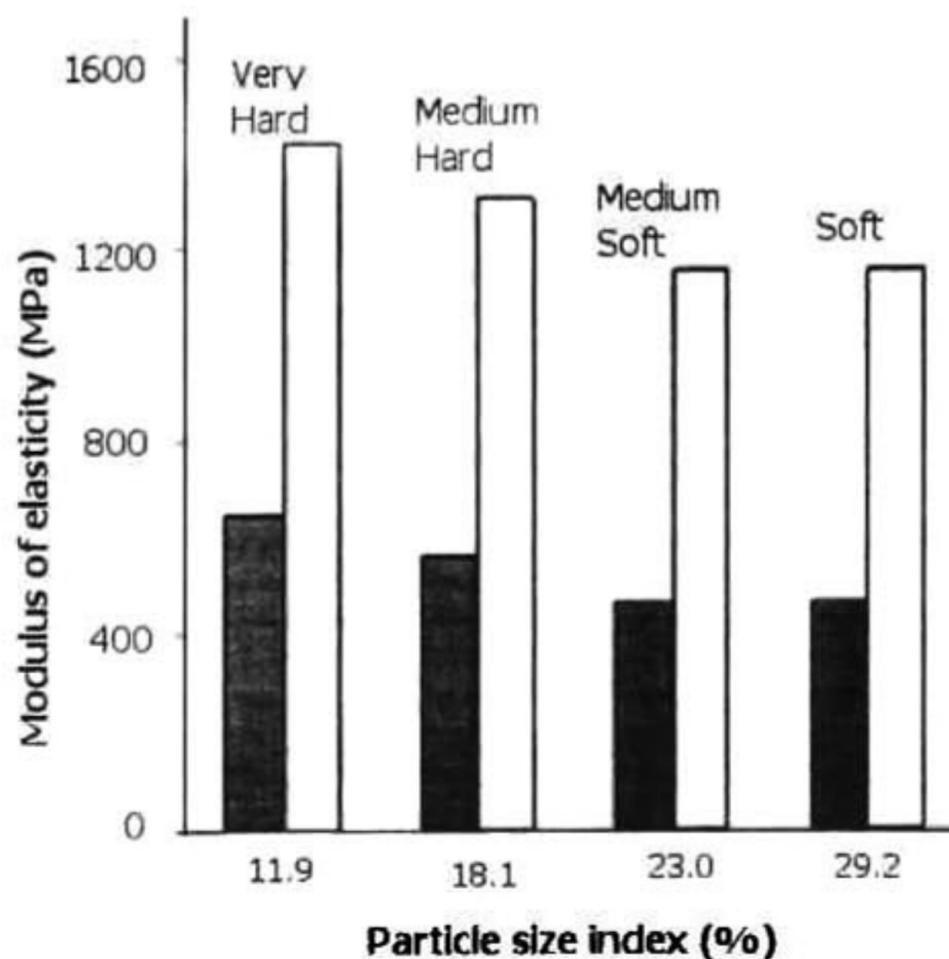


Figura 11. Relación entre el módulo de elasticidad de trigo en grano e índice de dureza PSI, 7.5% (blanco) y 16.5% (color) de humedad (Sayyah y Minaei 2004).

La dureza del núcleo de la cebada muestra una alta correlación significativa ($r=0.61$; $P\leq 0.001$) con el extracto de malta (López-Perea *et al.* 2008).

Los trigos suaves presentan un menor módulo de elasticidad que los trigos panaderos, y el valor para los trigos cristalinos es mayor que para los trigos fuertes (Ponce-García *et al.* 2008). El contenido de humedad es también un factor que influye en el valor del módulo de Young, tal como se observa en la Figura 11 presentando una relación inversa, es decir, a mayor contenido de humedad menor valor del módulo, esto debido a que el agua facilita el desplazamiento de las moléculas, disminuyendo la dureza de los granos de cereales en caso del trigo (Ponce-García *et al.* 2008, Sayyah y Minaei 2004) y cebada (Bergale y Irudayaraj 1995).

Existe la tendencia general de que al incrementarse el trabajo elástico para los trigos fuertes, se tendrá una mejor calidad reológica de las masas (Maucher 2008).

Estudios con mayor profundidad, muestran que trigos que tienen presentes Glu-A1 y 2*; Glu -D1: 5 + 10 generalmente son granos duros y poseen los valores de módulo de elasticidad mayores (Figuerola *et al.* 2009). Granos con las subunidades Glu-A1 nulo; GluB1 7 + 8; y Glu-D1 2 + 12, son granos suaves y muestran valores de trabajo elástico menores (Figuerola *et al.* 2009, Maucher 2008, Maucher *et al.* 2009).

De igual forma se aprecia una tendencia a que valores altos en el trabajo elástico en la deformación de los granos de trigo son correlacionados con las mejores calidades de las propiedades reológicas de las masas (Figuerola *et al.* 2009, Maucher 2008).

La prueba para evaluar las propiedades mecánicas del grano de trigo fue propuesta por Ponce García *et al.* (2008), y se basa en la curva esfuerzo deformación, generada a partir de la compresión de granos individuales, la cual se

muestra en la Figura 12. De esta gráfica, a partir de la deformación del trigo se puede obtener el trabajo plástico, el trabajo elástico y el valor de la carga o fuerza máxima, utilizada para calcular el módulo elástico.

Para poder calcular el módulo de Young, se deberá conocer antes algunos conceptos:

Esfuerzo (σ): es la cantidad de fuerza aplicada por unidad de área, las unidades comunes son $N/m^2 = Pa$ (Heldman y Lund 2007).

Deformación (Δh): es el cambio de altura que sufre el grano

Deformación unitaria (ϵ): es el cambio de altura que sufre el grano, en relación a su altura inicial.

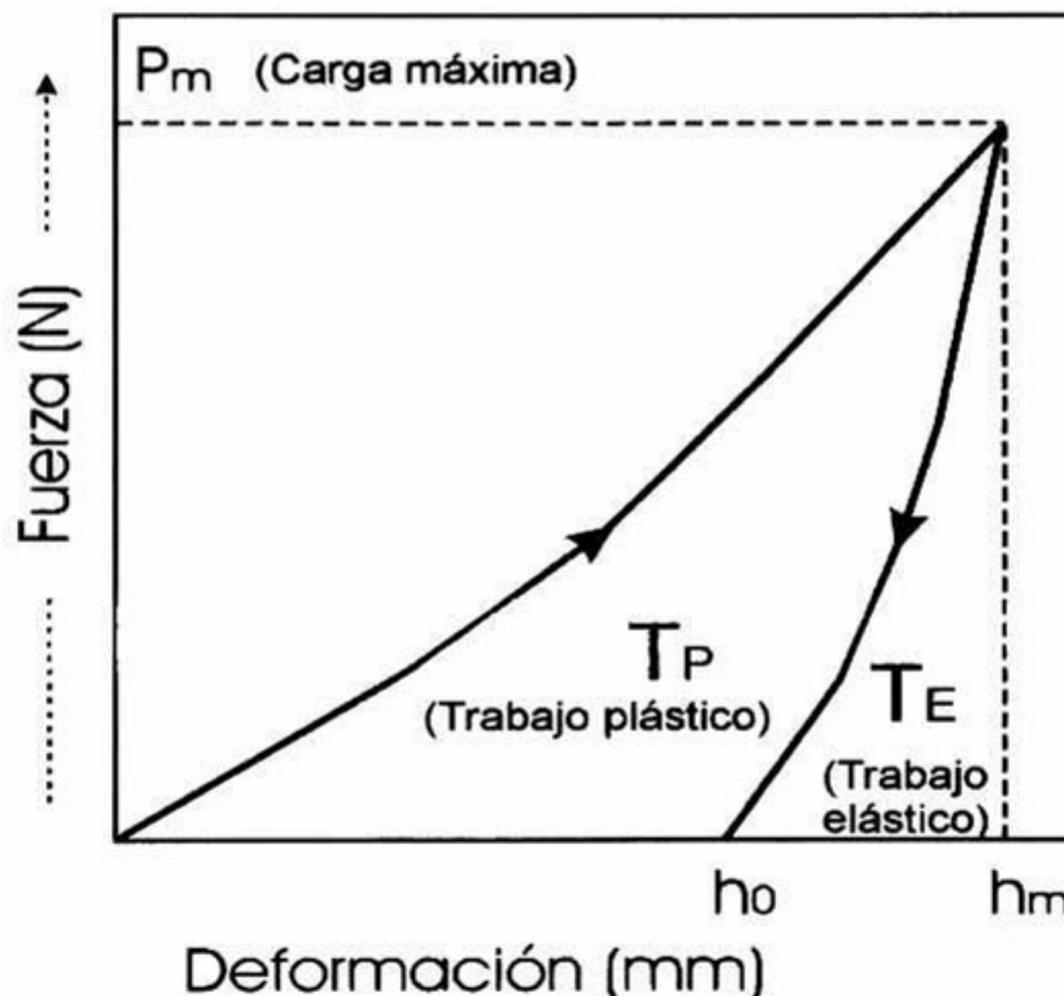


Figura 12. Ciclo esquemático de compresión (Ponce-García *et al.* 2008)

El módulo de elasticidad (E), puede ser calculado, empleando la teoría de la elasticidad en un régimen lineal, a partir de la medición de la altura inicial del grano, la fuerza generada por la compresión uniaxial del trigo en placas paralelas (ASAE 2003), y por último el área de máximo contacto del grano de trigo con la

placa superior, de acuerdo al método propuesto por Ponce García *et al.* (2008), mediante la ecuación 1.

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} = \frac{F/A}{\Delta h/h} \quad (1)$$

Donde:

E = módulo de elasticidad (Pa)

σ = Esfuerzo (Pa)

ε = Deformación unitaria

F = Fuerza de compresión

A = Área de contacto

Δh = Cambio en la altura del grano (mm)

h = Altura inicial del grano (mm)

En la Figura 13 podemos se observa la nomenclatura para la toma de medidas de las dimensiones del grano de trigo de acuerdo a lo propuesto por la literatura (Sun *et al.* 2007).

Dimensiones del grano de trigo

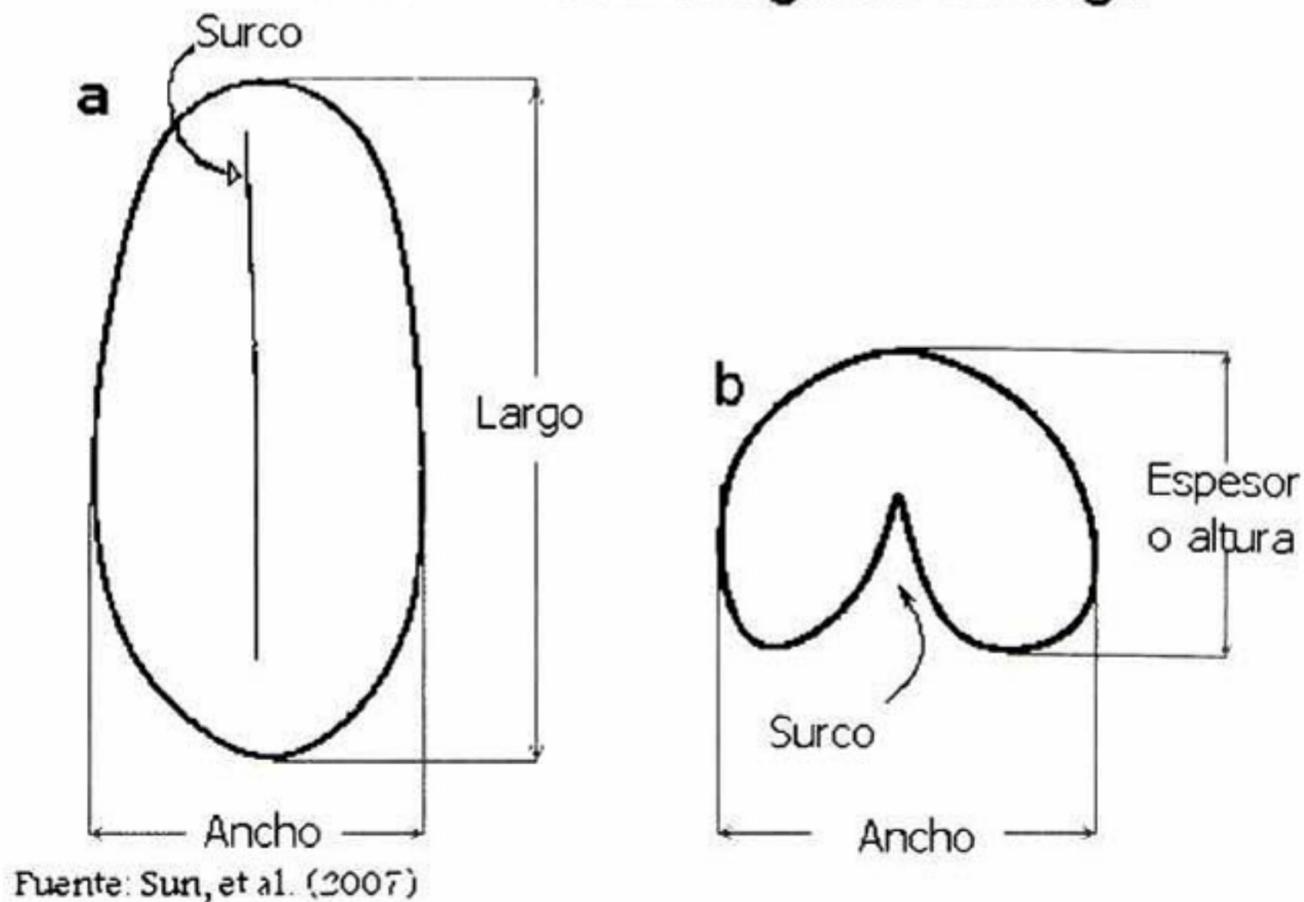


Figura 13. Esquema de las dimensiones del grano de trigo (a) vista aérea (b) sección transversal

3.1.3.2. Alveógrafo de Chopin

Este dispositivo está diseñado específicamente para medir la resistencia a la extensión biaxial de una hoja delgada de masa (harina/agua/sal), generalmente en un nivel de hidratación constante. Este proceso es similar al laminado, redondeo, y moldeado en el proceso de panificación. De la hoja de pasta obtenida después de la mezcla y extrusión, se cortan discos los que se relajan o reposan durante 20 minutos. Entonces, cada disco se sujeta por encima de un mecanismo que contiene una válvula y se sopla aire en el disco a una velocidad constante, creando así una burbuja. La presión dentro de la burbuja se registra hasta que se produce la rotura, dando la información final sobre la resistencia a la masa a la deformación (Carpanta 1998).

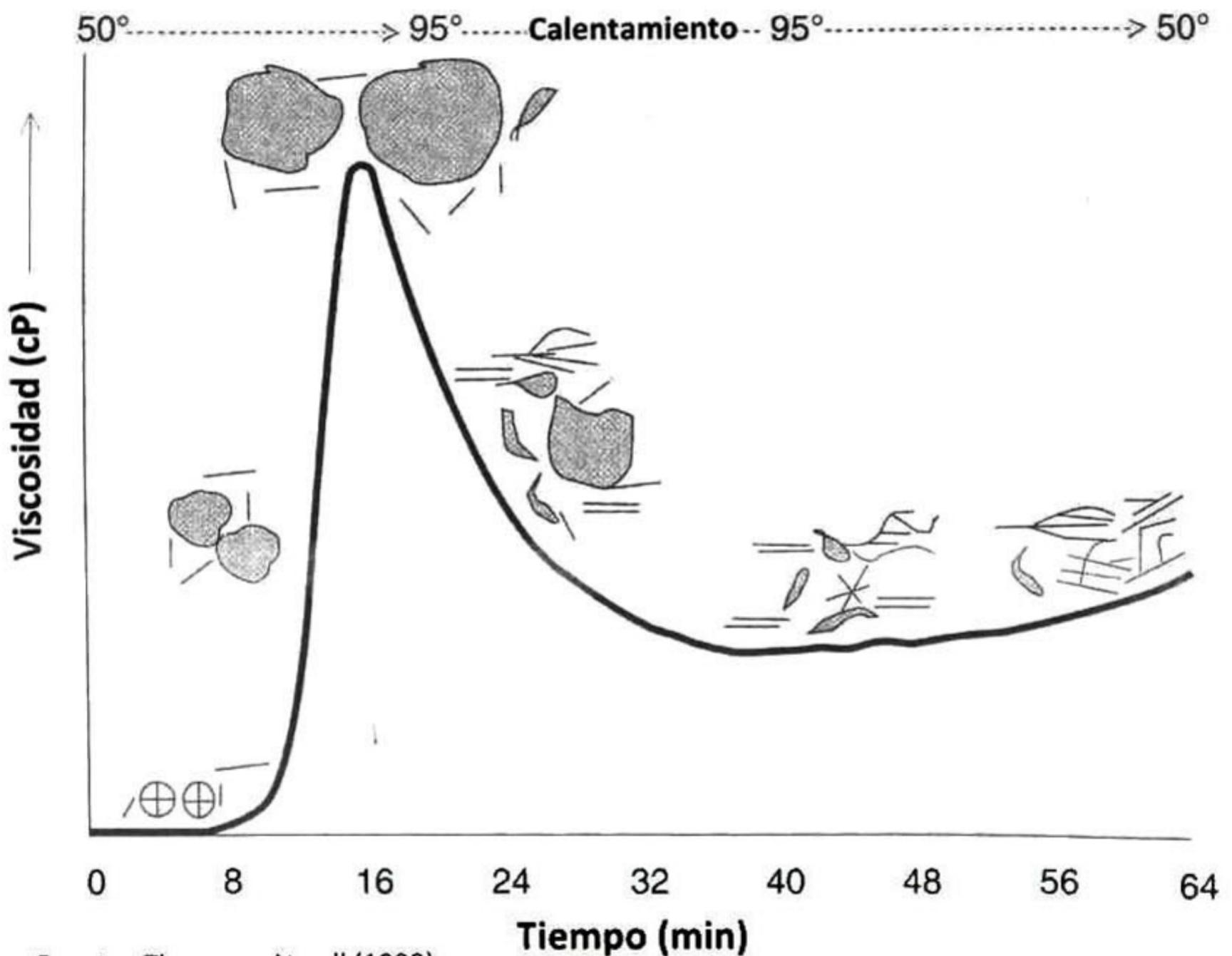
El Alveógrafo se considera que opera a esfuerzos cercanos a los observados durante la expansión de la masa, al hornear el pan. El alveograma es utilizado para obtener las propiedades reológicas de tracción.

En México las harinas se clasifican por su tipo de gluten con base a los valores del alveograma W y P/L: valores menores de $200 \times 10^{-4} \text{J}$ y $P/L < 1$ como gluten débil y extensible, de 200 a $300 \times 10^{-4} \text{J}$ y $P/L < 1$ como gluten medio fuerte y extensible, y $> 300 \times 10^{-4} \text{J}$ y $P/L < 1$ como gluten fuerte y extensible (Martínez-Cruz et al. 2007), siendo estos últimos los apropiados para la industria de la panificación.

3.1.3.3. Viscosidad

La viscosidad es una de las propiedades reológicas de las harinas, la cual está relacionada con la microestructura de ésta. En este caso el gran contenido de almidón del trigo, la relación amilosa / amilopectina y la longitud de sus cadenas son de gran importancia, además de la presencia de compuestos minoritarios, el esfuerzo de corte y el tratamiento hidrotérmico, son también importantes.

Los gránulos de almidón son generalmente insolubles en agua a temperaturas menores de 50 °C, presentando una baja viscosidad, al calentarse absorben gran cantidad de agua y se hinchan en varias veces su tamaño original, aumentando la viscosidad del medio, y la temperatura a la que se da este aumento, se le conoce como temperatura de gelatinización. La viscosidad máxima, asociada a una temperatura, indica la capacidad del almidón para absorber agua. Al mantener el esfuerzo mecánico, los gránulos comienzan a romperse, ocasionando que una alineación de los polímeros del almidón (Figura 14), por lo que disminuye la viscosidad aparente de la pasta (Hoseney 1991).



Fuente: Thomas y Atwell (1999)

Figura 14. Representación esquemática de los cambios de los gránulos de almidón en relación a la viscosidad.

3.1.4. Sedimentación

Esta determinación está, basada en la velocidad de expansión y sedimentación de las partículas proteicas de la harina, midiendo el volumen de sedimentación después de cinco minutos de descanso de la harina hidratada y tratada con una solución acuosa de bromofenol y otra solución débil de ácido acético con isopropanol. El llamado valor específico de sedimentación es obtenida mediante la división del valor de sedimentación y el contenido proteico de la muestra. Las harinas con más alto contenido de gluten tienen mayores valores de sedimentación.

El volumen de sedimentación de acuerdo a Martínez-Cruz (2007) es una medida indirecta de la fuerza de la harina.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Muestras de trigo

Se trabajo con cinco variedades de trigo, de las cuales 4 fueron proporcionadas por el INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias), específicamente a través del campo experimental del Bajío, las cuales fueron cultivadas en el ciclo O-I (Otoño – Invierno) 2006-2007, bajo condiciones de riego, estas variedades son las que se irradiaron en grano de acuerdo a la Tabla 7. Tacupeto que es la variedad irradiada en harina fue proporcionada por CIMMYT (Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo), y fue cultivada en el valle del Yaqui bajo condiciones de temporal en el ciclo P-V (Primavera – Verano) 2007

Tabla 7. Características de las variedades de trigo analizadas.

Variedad	Grupo ^a (tipo de gluten)	Uso	Humedad (%)	Proteína (%)	Irradiado En
Salamanca	Suave (III)	Galletero	11.8	9.9	Grano
Josecha	Fuerte (I)	Panadero	11.4	11.8	Grano
Monarca	Fuerte (II)	Panadero	11.3	12.5	Grano
Gemma	Cristalino (V)	Pastas	10.3	14	Grano
Tacupeto	Suave (III)	Galletero	12.8	9.8	Harina

^a Tomado de memoria de ponencia (Solís y Ríos 2007)

Se realizó la irradiación con microondas directamente sobre los granos de trigo en cuatro variedades que fueron Monarca, Josecha, Gemma y Salamanca. Tacupeto se irradió la harina. En ambos casos se separó una porción que fue utilizada como control o testigo. Las características de las variedades se observan en la Tabla 7.

3.2.2. Irradiación con microondas

Para irradiar el trigo en grano y en harina se utilizó un horno de microondas convencional modelo R-501CW marca Sharp Electronics Corp. (Mahwah, NJ) con una potencia de 1.45 kW, y una frecuencia de 2,450 MHz (López-Perea *et al.* 2008).

La calibración del microondas se realizó introduciendo un vaso de precipitado en el horno con 100 ml de agua, la cual fue calentada en el horno por 40 segundos, en la que la temperatura inicial y final fueron medidas. Para poder conocer la energía total absorbida por el agua se puede utilizar la fórmula 2 (Khraisheh *et al.* 2004, López-Perea *et al.* 2008).

$$Q = mCp\Delta T \quad (2)$$

Donde:

Q = Cantidad de calor absorbido por el agua (J)

m = masa de agua (kg)

Cp = Calor específico (J/kg°C), para el agua = 4817

$\Delta T = T_{\text{final}} - T_{\text{inicial}} =$ Diferencia de temperatura (°C)

Para conocer la potencia o cantidad de energía por tiempo se utiliza el resultado de la ecuación 2 dividida entre el periodo de tiempo tal como se observa en la ecuación 3 (Khraisheh *et al.* 2004).

$$\dot{Q} = \frac{mCp\Delta T}{\Delta t} \quad (3)$$

Dónde:

\dot{Q} = Potencia (W [=] J/s)

$\Delta t = t_{\text{final}} - t_{\text{inicial}} =$ Tiempo de irradiación (s)

Al calentar los 100 ml de agua, se supone que 1 ml tiene un peso de un gramo, y tenía una temperatura de 24 °C y la temperatura después de 40 segundos de exposición fue de 64 °C, que sustituyendo en las ecuaciones, y considerando que el calor específico del agua es de $4,184 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}$ y no cambia con la temperatura.

Se tiene que $Q = 0.1\text{kg} \left(4,184 \frac{\text{J}}{\text{kg } ^\circ\text{C}}\right) (64 - 24^\circ\text{C}) = 16,736 \text{ J} = 16.736 \text{ kJ}$, que es la energía total que absorbió el agua. Calculando la potencia:

$\dot{Q} = 16.736 \frac{\text{kJ}}{40\text{s}} = 4.184 \text{ kW}$, que es la energía que absorbió el agua en cada segundo.

Posteriormente en bolsas de polietileno se colocaron 100 gramos de granos o harina de trigo, según sea el caso, los cuales se distribuyeron uniformemente sobre la charola del microondas, se tomó la temperatura antes y después de la irradiación con una pistola de infrarrojo para conocer la temperatura inicial y final, y así determinar la energía absorbida por las muestras, dado que el tamaño de las muestras fue de 1.3 kg, esta operación se realizó 13 veces por muestra.

3.2.3. Análisis físico

3.2.3.1. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad se determinó de acuerdo a la metodología propuesta por Ponce García (2008). Utilizando un analizador de textura TA-XT2 (Texture Technologies Corporation Stable Micro Systems, Surrey, England), para medir la fuerza de compresión ejercida sobre el grano y la deformación del trigo entre dos placas paralelas, para medir las dimensiones del grano se utilizó un vernier (modelo CD-6 CS, Mitutoyo, Japón), posteriormente para determinar el área de contacto, se entinta el grano en un cojín para sellos, y se coloca en el medio de

dos papeles de tamaño 30 x 30 mm al grano, y se realiza la compresión, el papel superior con la huella se digitaliza y el área se calcula con el software Image-J. El módulo de elasticidad fue calculado de acuerdo a la ecuación (1).

3.2.3.2. Peso hectolítrico

Es una relación de peso/volumen, indica la densidad y/o llenado del grano, definido principalmente por la morfología del grano, y es afectado por deficiencia de agua y altas temperaturas en la etapa de llenado del grano, es un factor importante en la comercialización. Para obtener este valor. También recibe el nombre de peso específico del grano, y se determinó en una muestra de 500 ml con una balanza volumétrica (Seedburo Equipment Co., Chicago, Il), mostrada en la Figura 15.

3.2.3.3. Proteína y PSI en grano

La proteína y PSI (índice de tamaño de partícula por sus siglas en inglés) en grano se determinaron con el Infralyzer 300 (Technicon, N. Y.), por reflectancia / transmitancia en el infrarrojo cercano, ver Figura 15, con los métodos 39-10 y 39-70 de la AACC (1995), respectivamente, estos datos solo se utilizaron para saber las condiciones para el proceso de acondicionamiento.

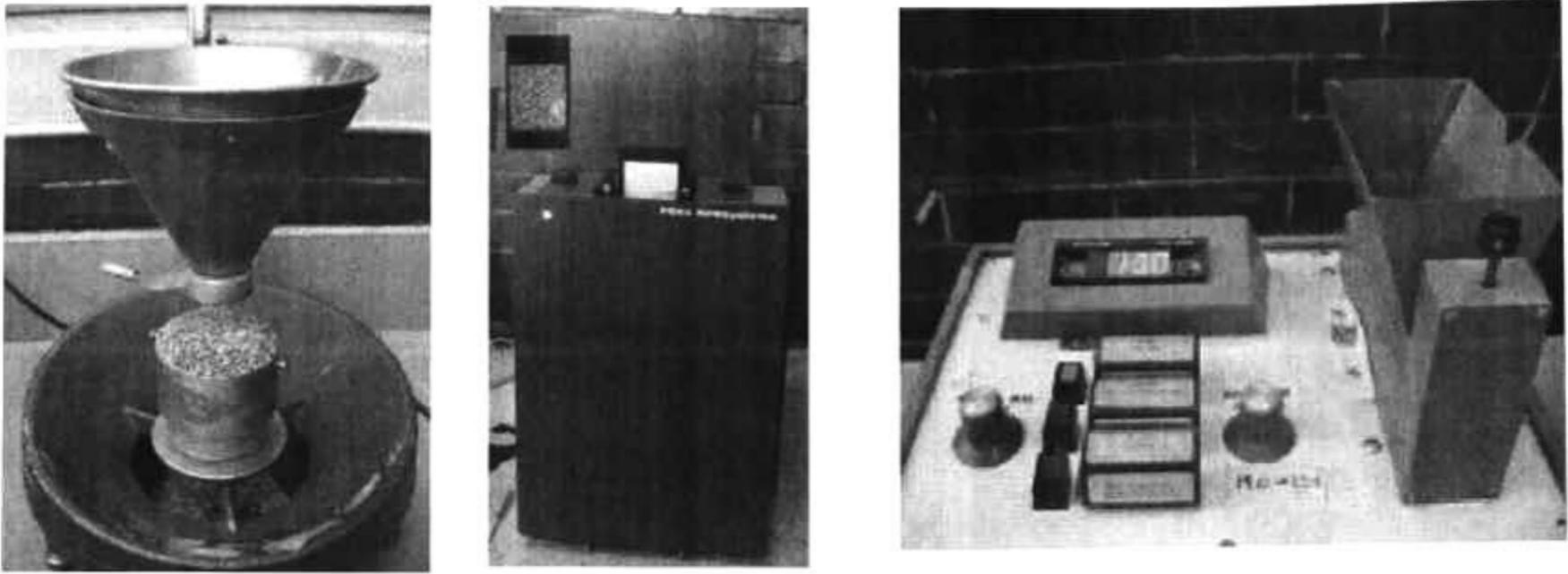


Figura 15. De izquierda a derecha balanza volumétrica (peso hectolítrico), infralyzer 300 (dureza y proteína en grano), Steinlite (humedad).

La calibración del Infralyzer 300 para el PSI, se realizó con base al método 55-30 de la AACCC (1995), que consiste en cernir una muestra de harina integral, que se obtiene al moler el grano de trigo en un molino de impacto con malla de 1.0 mm de apertura. Los trigos suaves tienden a producir mayor proporción de partículas finas (Peña *et al.* 2007).

3.2.3.4. Humedad

Este parámetro se determina por conductividad eléctrica en una muestra de 100 g mediante el método 44-10 de AACCC (1995), en el equipo Steinlite, (ver Figura 15), para el proceso de acondicionamiento del grano.

3.2.4. Molienda

Previo a la molienda se el grano se sometió a un acondicionamiento por adición de agua, de acuerdo al método 26-95 de la AACCC (1995), considerando la dureza, humedad y proteína del grano. En el cual se calcula una primera adición de agua, homogenizado y reposo durante 24 horas.

La molienda se realizó con un molino neumático Buhler (Buhler Brothers Ltd., suiza), de acuerdo con la técnica AACC 26-21, como el mostrado en la Figura 16.

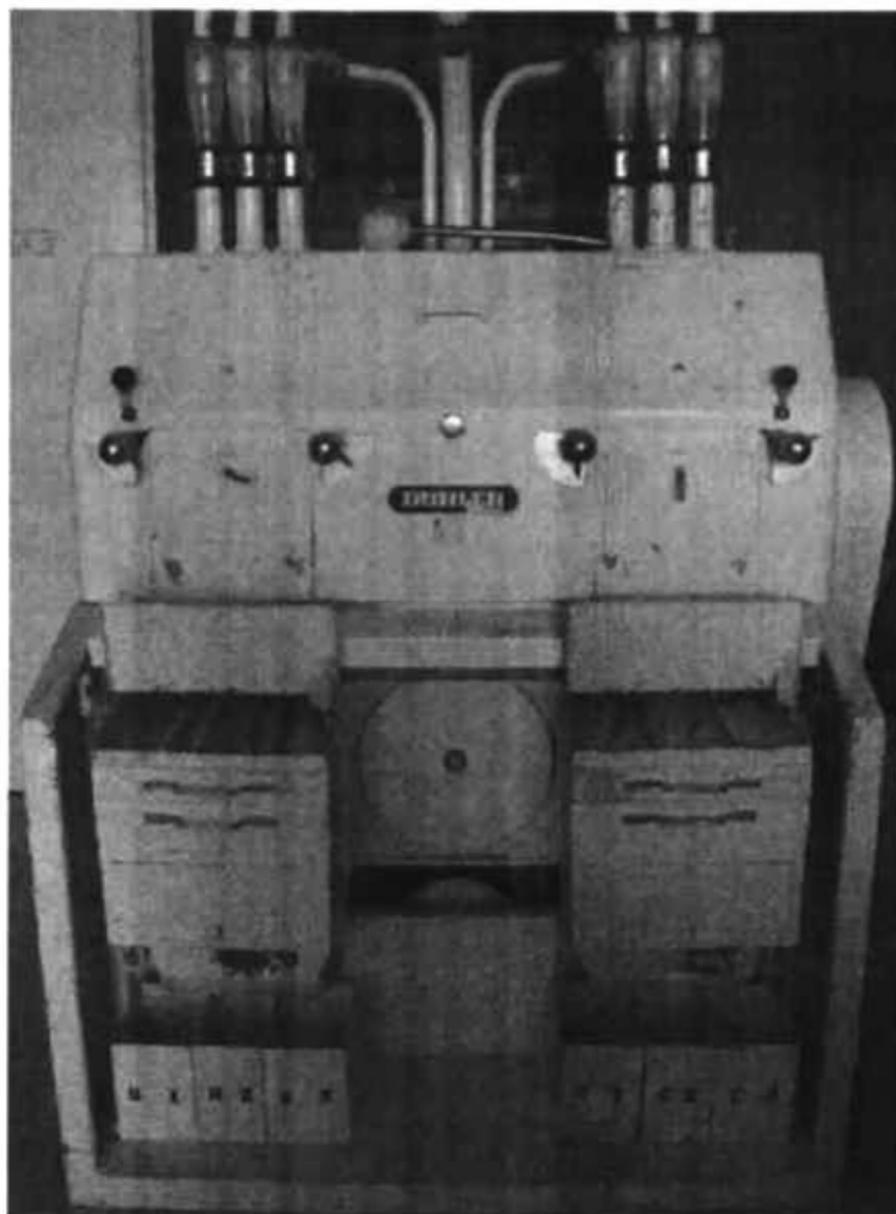


Figura 16. Molino Buhler (cortesía CIMMyT)

3.2.5. Análisis químico

3.2.5.1. Proteína de la harina

La proteína (%) se determinó por reflectancia de luz dentro del rango del cercano infrarrojo, calibrado con el método 39-10 de la AACC (1995), con los valores de contenido de proteína determinados por el método Kjeldahl 46-11a de la AACC (1995); se utilizó para esta determinación el analizador Infratec 1255 NIR Food and Feed Grain (Ultra Tec Manufacturing Inc., Santa Ana, CA).

3.2.5.2 Sedimentación

El volumen de sedimentación (ml) se determinó con un gramo de harina, a la que se le agrega 8 ml de de solución acuosa de bromofenol (4 mg/l), para colorear y apreciar mejor la medición, además de una solución de ácido láctico y agua en una relación 1:8, más la solución de SDS (dodecil sulfato de sodio por sus siglas en inglés), Las dos últimas soluciones se mezclan en una relación 1:48, respectivamente, antes de usarse en la prueba, que después de una serie de mezclado, agitación y reposo se lee en la probeta de 25 ml el volumen de sedimentación.

3.2.6. Análisis reológicos de las harinas

3.2.6.1. Alveograma

La prueba del alveógrafo (Figura 17) mide las propiedades de tenacidad y elasticidad de las masas, mediante la inyección de aire en la masa en forma de disco de dimensiones estandarizadas.

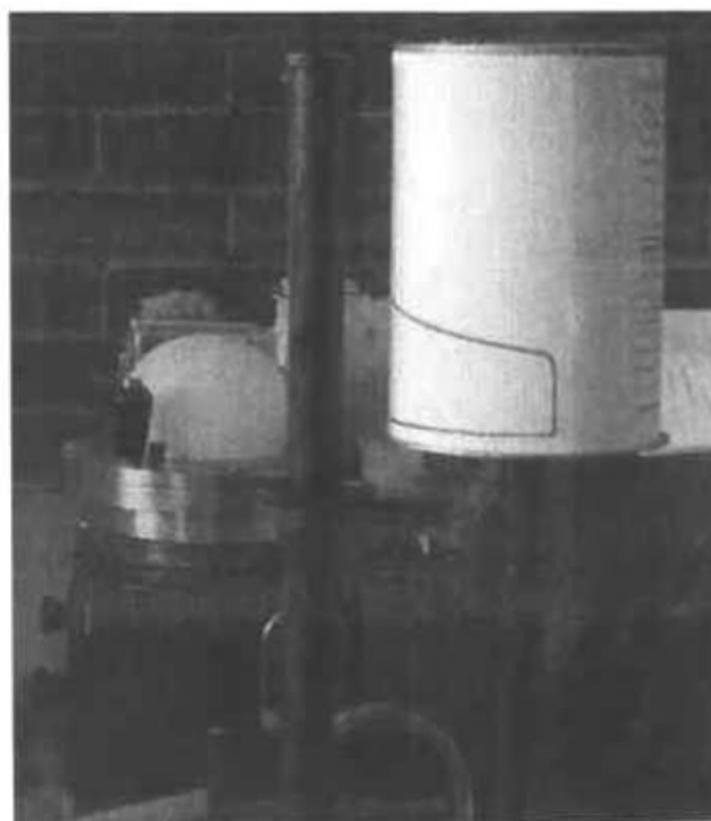


Figura 17. Alveógrafo de Chopin (cortesía CIMMyT)

Esta determinación se realizó de acuerdo al método AACC 54-30^a (AACC-International 1995). Y consiste en amasar 60 gramos de harina utilizando el criterio de consistencia constante (absorción variable, 50 -57%), y ajustando el tiempo de mezclado de 7 a 9 minutos, para obtener una masa tersa. La cantidad de agua salina a utilizar está determinada en función al porcentaje de humedad inicial de la harina, así como del tipo de trigo, en función de su utilidad industrial. La masa resultante es laminada con un rodillo para obtener un espesor constante (12 mm), ésta es cortada en discos de diámetro y grosor uniforme, los cuales son lubricados, con aceite de cocina. Los discos son introducidos en la minicámara de fermentación o reposo del aparato. Después de 20 minutos de reposo se realizan los ensayos. El disco de masa se coloca en el centro de la platina fija o placa de soporte del alveógrafo, posteriormente se cierra y se presiona de una manera estandarizada mediante el movimiento lento de la platina superior.

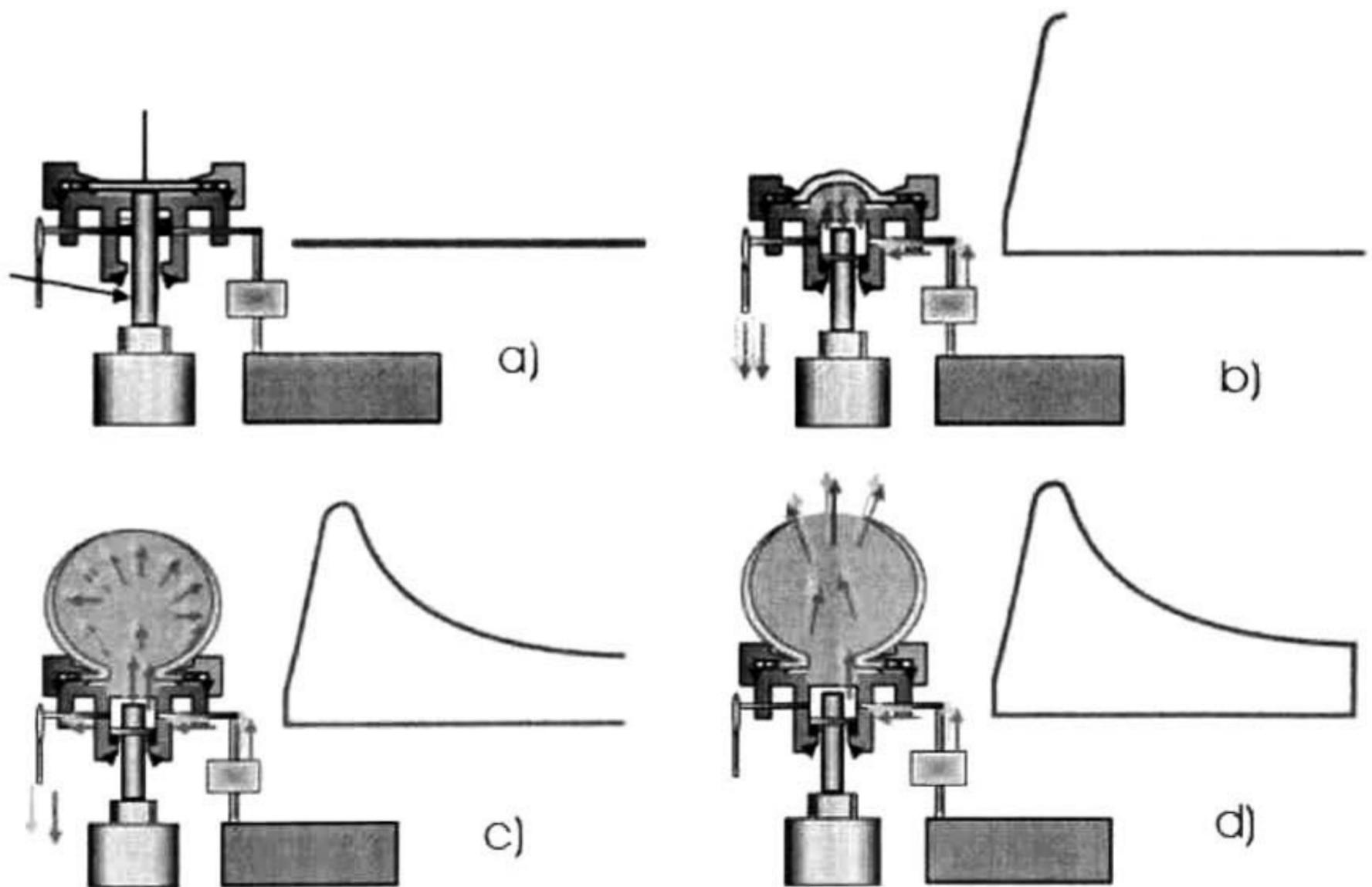


Figura 18. Esquema de trazado de alveograma: a) posición de partida, b) resistencia de la masa (tenacidad), c) deformación de la masa en una burbuja (extensibilidad) d) rotura de la burbuja (fin del ensayo)

Finalmente se remueve la tapadera, se inyecta manualmente aire con el objetivo de despegar el disco de la masa y se inyecta aire a presión constante. El aire inyectado (insuflado) provoca la formación de una burbuja, la cual se hincha formando un pequeño globo, el cual opondrá una fuerza a deformarse, hasta que finalmente se rompa. El alveograma, se va trazando según el paso que se esté realizando, como se observa en la Figura 18.

La información que se obtiene de un alveograma (ver Figura 19) es la siguiente:

La altura del pico ajustado (P, mm). Está relacionado con la fuerza máxima que opone la masa a ser deformada.

La longitud de la curva (L, mm). Es proporcional al volumen obtenido antes ruptura. El valor L es generalmente relacionado con la extensibilidad de la masa y predice las características de manejo de la masa.

El trabajo (W, J). El valor de W es la cantidad de trabajo requerido para la deformación de la masa y se relaciona con la coacción "fuerza" de la de harina.

Relación P/L. Indica el equilibrio de la masa. Se utiliza para conocer la cantidad de trabajo adecuada para cada harina.

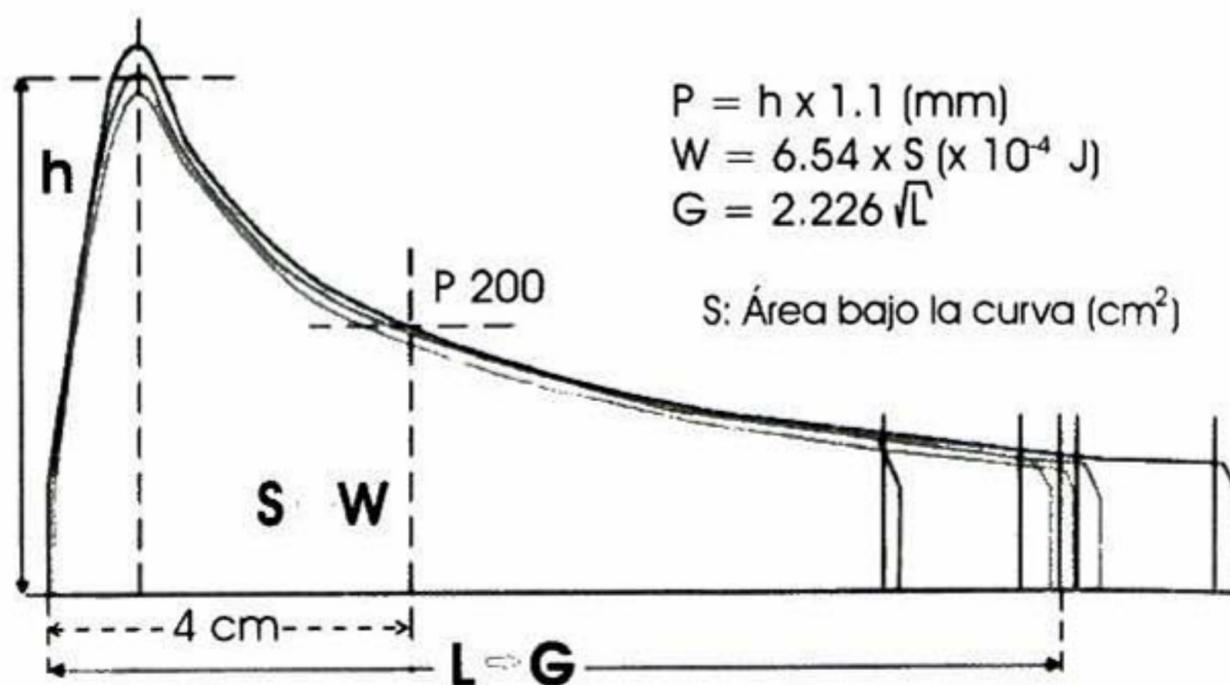


Figura 19. Diagrama esquemático de un alveograma.

Valor G (índice de hinchamiento). Está representado por el volumen de aire necesario para provocar la ruptura de la burbuja de masa. Indica la elasticidad de la masa, que está relacionada con la aptitud de la harina para producir un tipo de pan bien desarrollado. Cuanto mayor sea este valor más se asegurará que la harina al panificar tendrá suficiente elasticidad para permitir que el CO₂ producido en la fermentación se difunda ampliamente en la masa (AACC-International 1995).

3.2.6.2. Viscosidad

El perfil de viscosidad fue obtenido con un viscosímetro "Rapid Visco-Analyzer" (RVA, modelo 3C Newport Scientific PTY Ltd., Sidney, Australia), utilizando 4 gramos de harina, al 14% de humedad (ecuación 4), y completando a 28 gramos con agua destilada (Narváez et al. 2007).

$$PesoHarina = 4 \frac{100 - 14}{100 - HumedadHarina(\%)} [=] \text{gramos} \quad (4)$$

La muestra se mantiene en agitación constante a 50 °C durante 2 minutos, posteriormente se eleva la temperatura a una razón de 5.5 °C/min, hasta alcanzar los 92 °C, manteniéndose a esta temperatura durante 5 minutos, seguido de un enfriamiento a una velocidad de 5.6 °C/min, y finalmente mantenerse por un minuto a 50 °C. Se determinó la viscosidad máxima durante el ciclo de calentamiento y la viscosidad final, las unidades de viscosidad se reportaron en centipoises (cP) (Narváez et al. 2007).

3.2.6.3. Calidad panadera

Para evaluar la calidad panadera de las harinas, se utilizó la técnica de panificación de masa directa, utilizando el método AACC 10-09 (1995), sin adición

de oxidantes u otro tipo de aditivo que pudiera interferir con la expresión de las características reológicas; con la formulación de ingredientes de la Tabla 8.

Tabla 8. Ingredientes para panificación método AACC 10-09

Ingrediente	Cantidad
Harina refinada (14% de humedad)	100 g
Leche en polvo	3 g
Grasa vegetal	3 g
Solución de levadura al 12%	25 ml
Solución de azúcar – sal (20 y 4%)	25 ml
Agua destilada	según absorción

La harina y demás ingredientes se mezclaron en un microamasador (Figura 20) de pernos, hasta obtener una masa bien desarrollada, homogénea y cohesiva. Posteriormente se fermentó en la cámara de fermentación a 30 °C y una humedad relativa de 95%; durante 3 horas 55 minutos, en este lapso de tiempo se realizaron 2 desgasificaciones con la finalidad de eliminar el exceso de CO₂ para que las levaduras aprovecharan al máximo los azúcares, además de distribuir uniformemente las celdillas, cuidando de no romperlas; se realizó además el moldeo, que es la formación de un cilindro, el cual se colocó dentro de un molde. Seguido de esto se llevó a cabo el horneado a 220 °C durante 25 minutos; saliendo del horno los panes se retiraron del molde, se pesaron y se les determinó el volumen con ayuda de un volutómetro por desplazamiento de semillas de colza (*Brasica sp.*) (De-la-O *et al.* 2006).



Figura 20. Panificación, de izquierda a derecha: amasado, horneado y producto final.

3.2.7. Reflectancia difusa de infrarrojo por transformada de Fourier

De la harina de trigo se tomaron 4 mg se mezclaron con 196 mg de KBr previamente secado en un horno durante 24 horas a 135 ° C para eliminar la humedad. El análisis espectroscópico se realizó en un espectrofotómetro Perkin-Elmer Spectrum GX de reflectancia difusa con accesorio Easi Diff (modelo Pike) para reflectancia difusa en el infrarrojo por transformada de Fourier (DRIFT). Los espectros se recogieron en 4 cm⁻¹ de resolución, con el rango de número de onda de 400-4000 cm⁻¹; tomando la media de 16 lecturas, el espectro es registrado como archivos ACII. El espectro de KBr puro se restó el espectro de las muestras analizadas.

3.2.8. Análisis estadístico

En estos experimentos se empleó un diseño de bloques al azar, donde los bloques son las variedades y los tiempos de irradiación con microondas los tratamientos, cuyo modelo estadístico es:

$$Y_{ij} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \epsilon_{ij}$$

Y_{ij} Valor de la variable respuesta correspondiente al i-ésimo tratamiento en el bloque j.

μ Media general.

α_i - Efecto del i-ésimo tratamiento.

β_j - Efecto del j-ésimo bloque.

ϵ_{ij} -Error experimental

Los resultados de comparación de medias de las variables respuesta son presentados mediante la prueba de Duncan ($p < 0.05$), con el software Statistical Analysis System (SAS 1999).

4. Resultados y discusión

El término calidad se puede expresar de acuerdo a características específicas. Su significado es diferente para: los genetistas, productores de semilla, agricultores, molineros, panaderos, los procesadores de pasta, o consumidores. Los químicos de cereales usan algunos de los métodos convencionales, como la dureza del grano, propiedades físicas y químicas, pruebas alveográficas, farinográficas, mixográficas, sedimentación y/o pruebas de panificación, así como las técnicas de separación de proteínas, entre otros, para evaluar el trigo, y la calidad de panificación. En el presente trabajo de investigación se utilizaron los métodos mecánicos y físico-químicos, así como los procedimientos tradicionales de fabricación de pan, a fin de evaluar el efecto de la radiación de microondas en la calidad del trigo

4.1. Propiedades físicas y químicas

Tabla 9. Propiedades físicas y químicas en diferentes variedades de trigo

Variedad	Tipo de gluten	Peso Hectolítrico (kg/hl)	Sedimentación (ml)	Proteína (%)
Tacupeto	Suave (III)	-	-	9.8 d
Salamanca	Suave (III)	-	-	9.9 d
Monarca	Fuerte (I)	81.7 a	22.4 a	12.5 b
Josecha	Fuerte (I)	80.3 b	21.3 b	11.8 c
Gemma	Cristalino (V)	79.6 c	16.0 c	14.0 a

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤ 0.05)

^b: Sedimentación y proteína están ajustadas a una humedad base de la harina de 14%.

La Tabla 9 muestra algunas propiedades físico – químicas importantes para la calidad del trigo en la panificación. Se pueden observar diferencias significativas en las variedades analizadas; la mayor diferencia se da entre las variedades Monarca y Gemma en peso hectolítrico y sedimentación, lo que se puede explicar por el tipo de gluten. En general las muestras analizadas, se encontraban limpias y

con un llenado de grano adecuado. Pesos hectolítricos bajos (menores a 76 kg/hl) suelen mostrar bajos rendimientos al momento de procesarlos en harina (Peña et al. 2007).

La cantidad de proteína varía también en relación al tipo de gluten, siendo Gemma (cristalino) el de mayor cantidad de proteína, seguido de Monarca y Josecha, clasificados dentro del grupo I, y por último Salamanca y Tacupeto que son suaves, que también coincide con lo mencionado por Hosney (1991), que la dureza, está relacionada con un alto contenido de proteína, y la suavidad generalmente se asocia a una baja concentración de proteína.

Con relación a la sedimentación se observa que la variedad de trigo panadero Monarca es la que tiene el mayor valor, seguida de Josecha, por último Gemma, que es una variedad de trigo cristalino o durum, lo cual correspondería con lo citado en la literatura (Carter et al. 1999) que a mayor cantidad de proteína mayor volumen de sedimentación; sí bien para el caso de la variedad Gemma, esto no se cumple, ya que es el que presentó mayor cantidad de proteína y el menor índice de sedimentación, esto debido a una menor calidad de la proteína, asociado a *Triticum durum*, debido a la falta del cromosoma D el cual genéticamente no poseen los trigos tetraploides (Sapirstein et al. 2007).

Se puede observar en la

Figura 21, que no existe una tendencia específica del tratamiento con microondas en el volumen de sedimentación. Por una parte la variedad de trigo panadero Monarca presentó un ligero incremento en el valor de sedimentación, mientras que Josecha presentó una tendencia a disminuir su valor, y por último el trigo cristalino se mantuvo con poca variación para 5 y 10 segundos, disminuyendo el volumen de sedimentación en el tratamiento de 15 segundos de irradiación de microondas.

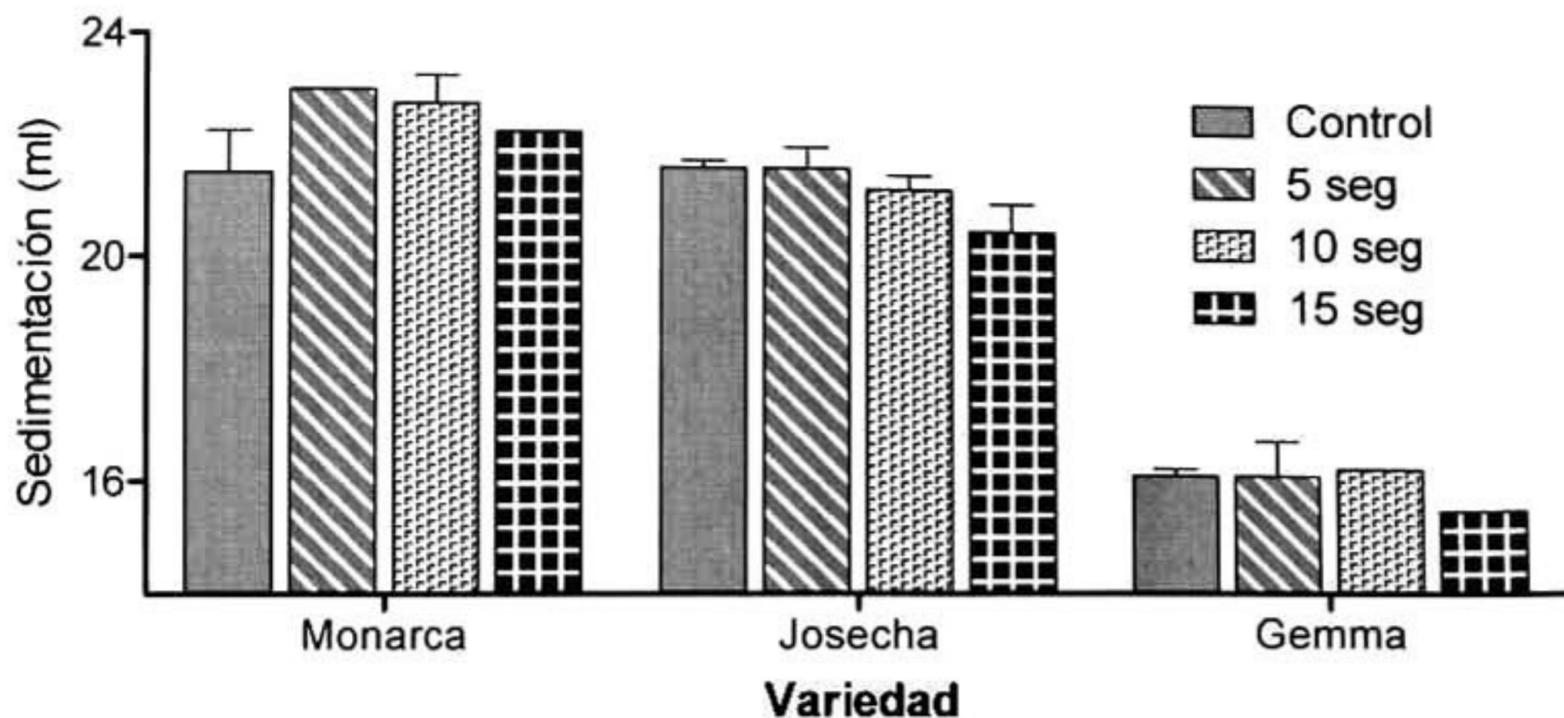


Figura 21. Efecto de la irradiación de microondas en el volumen de sedimentación de las variedades de trigo analizadas

4.2. Efecto de la radiación de microondas en la temperatura del material

La temperatura alcanzada por los materiales irradiados se muestra en Tabla 10, donde se observa que con 15 segundos la mayor temperatura se alcanza cuando el trigo está en harina, esto debido al incremento de la superficie de exposición. Valores similares fueron encontrados en granos de cebada irradiados con microondas por López Perea *et al.* (2008), donde temperaturas mayores de 58-62 °C pueden afectar la germinación de la cebada.

En el grano de trigo se ha reportado que temperaturas mayores a 57-65 °C disminuyen la cantidad de gluten húmedo (Campaña *et al.* 1986). En el maíz reportaron que el secado con microondas (Nofsinger *et al.* 1980) sin sobrepasar los límites de 60-65 °C no afectan significativamente la capacidad de germinación del grano. Estas temperaturas son iguales a las del secado convencional.

Tabla 10. Temperaturas y humedades alcanzadas al aplicar la radiación de microondas.

Tratamiento	Irradiado	Control	05 s	10 s	15 s
Variedad	en	Temperatura (°C) / humedad (%)			
Salamanca	Grano	24 / 11.8	33 / 11.6	40 / 11.7	48 / 11.8
Monarca	Grano	24 / 11.3	28 / 11.4	34 / 11.3	43 / 11.4
Josecha	Grano	24 / 11.4	33 / 11.4	40 / 11.3	45 / 11.4
Gemma	Grano	24 / 10.3	31 / 10.2	35 / 10.8	43 / 10.8
Tacupeto	Harina	25 / 12.7	33 / 13.0	-	55 / 12.8

Las temperaturas observadas en la Tabla 10, están debajo de 58 °C, con el objetivo de controlar en lo posible que temperaturas mayores pudieran afectar negativamente el endospermo, ya que sí se daña demasiado el almidón este tiende a volverse muy viscoso (Dexter et al. 1994), debido a que la amilopectina puede salir más fácilmente del gránulo del almidón, sí está dañado, además, de ocasionar algunos cambios estructurales de la proteína para que ésta pueda formar una mejor red, evitando dañarla al grado de fraccionarla demasiado. Sin embargo, las variedades Josecha y Salamanca de menor contenido de proteína presentaron diferencias de 3 y 5 °C respectivamente comparadas con Monarca y Gemma.

4.3. Efecto de la irradiación de microondas en las propiedades mecánicas del grano.

La dureza del grano es uno de los factores de calidad más importante para productores de trigo, comerciantes y procesadores, ya que comúnmente es utilizada en la industria de la molienda para clasificar las variedades de trigo en relación a su molienda y propiedades de panificación (Dobraszczyk et al. 2002). La mayoría de los métodos para evaluar la dureza de grano son empíricos y basados en las propiedades generales de los granos enteros (Dobraszczyk et al. 2002, Greffeuille et al. 2006, Pomeranz et al. 1985).

Se esperaba que los granos pequeños de trigo fueran menos duros o suaves de acuerdo con lo reportado por varios autores (Li *et al.* 2008, Morgan *et al.* 2000, Pomeranz *et al.* 1985, Sutton *et al.* 1992, Tkachuk *et al.* 1990). Sin embargo en trigos panaderos dependiendo de la variedad todos los granos con espesores menores de 2.7 mm tienen baja dureza (fuerza a la deformación) y también módulo de elasticidad. La dureza es definida como una indicación de la fuerza a la adhesión entre los gránulos de almidón y la proteína que los rodea (Simmonds *et al.* 1973). Varios investigadores han definido la dureza en función de las propiedades mecánicas del material (Gates y Dobraszczyk 2004, Greffeuille *et al.* 2006, Ponce-García *et al.* 2008) tales como el esfuerzo y módulo de elasticidad; esto último es lo más aceptado para evaluar la dureza y será por tanto uno de los parámetros a evaluar en la presente investigación.

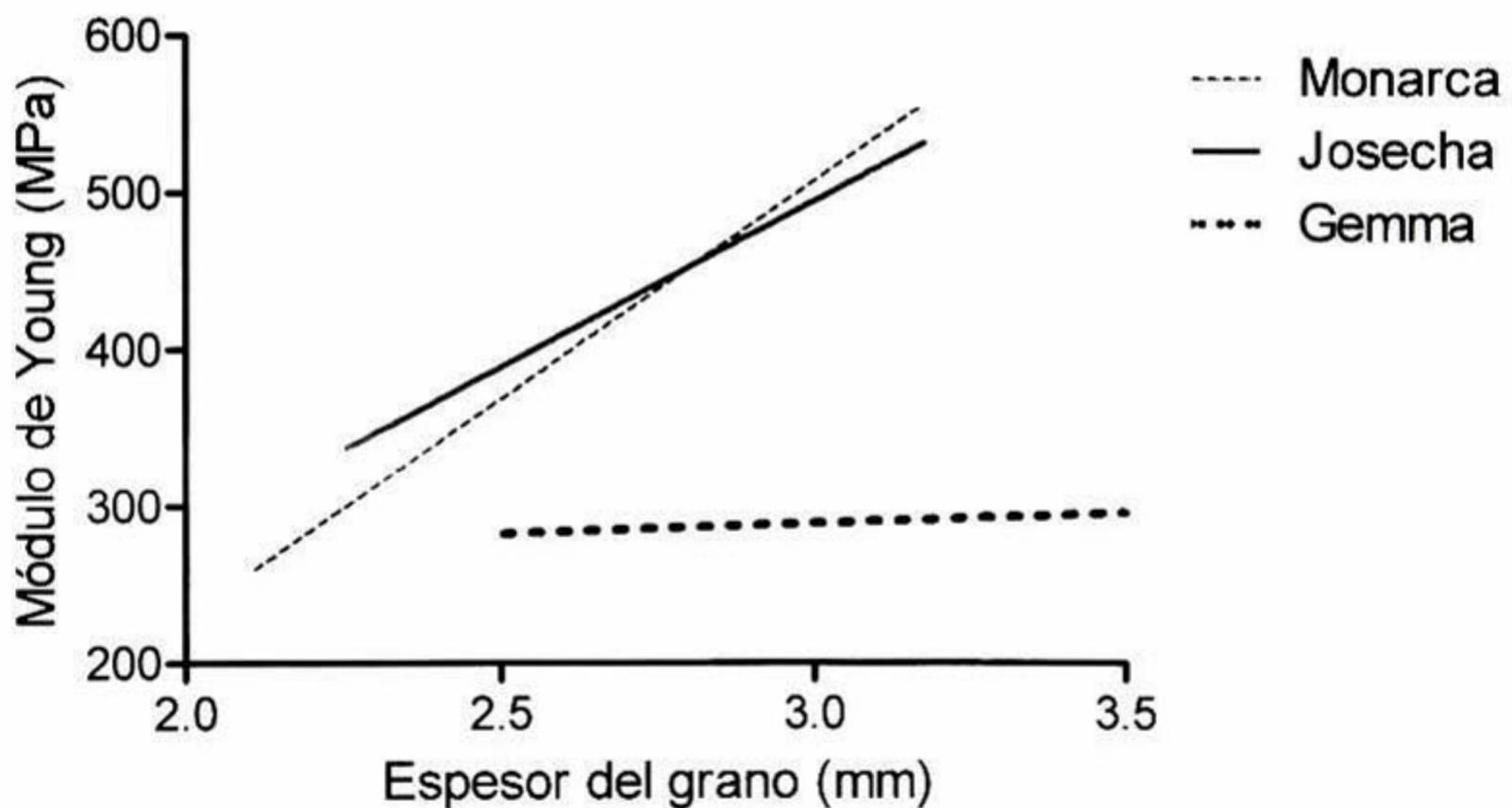


Figura 22 Variación del módulo de elasticidad con respecto a la altura del grano.

Se evaluaron tres variedades de trigo en grano las cuales fueron Josecha (I), Monarca (I) y Gemma (V), siendo los que presentaron mayor módulo de elasticidad los del tipo I, y el de menor módulo de Young la variedad cristalina, tal como se observa en la Figura 22, además que el módulo de elasticidad depende del espesor del grano, siendo los de mayor espesor o altura los que presentan un

mayor módulo de elasticidad, aunque en los trigos cristalinos la variación es menor. Similares tendencias fueron reportadas por Maucher *et al.*, (2009), y Figueroa *et al.* (2009).

El módulo de elasticidad se incrementa con el aumento del espesor o altura del grano (Figura 22). Estos datos concuerdan con los reportados por varios autores quienes han indicado que la dureza en el grano (módulo de elasticidad) depende del espesor del grano (Li *et al.* 2008, Morgan *et al.* 2000, Pomeranz *et al.* 1985, Sutton *et al.* 1992, Tkachuk *et al.* 1990).

En general, si el espesor de grano disminuye afecta negativamente el rendimiento de harina, cenizas y color; además se han reportado correlaciones altamente significativas entre el espesor de grano y la absorción de agua (Morgan *et al.* 2000), incluso con el volumen y calidad del pan (Sutton *et al.* 1992).

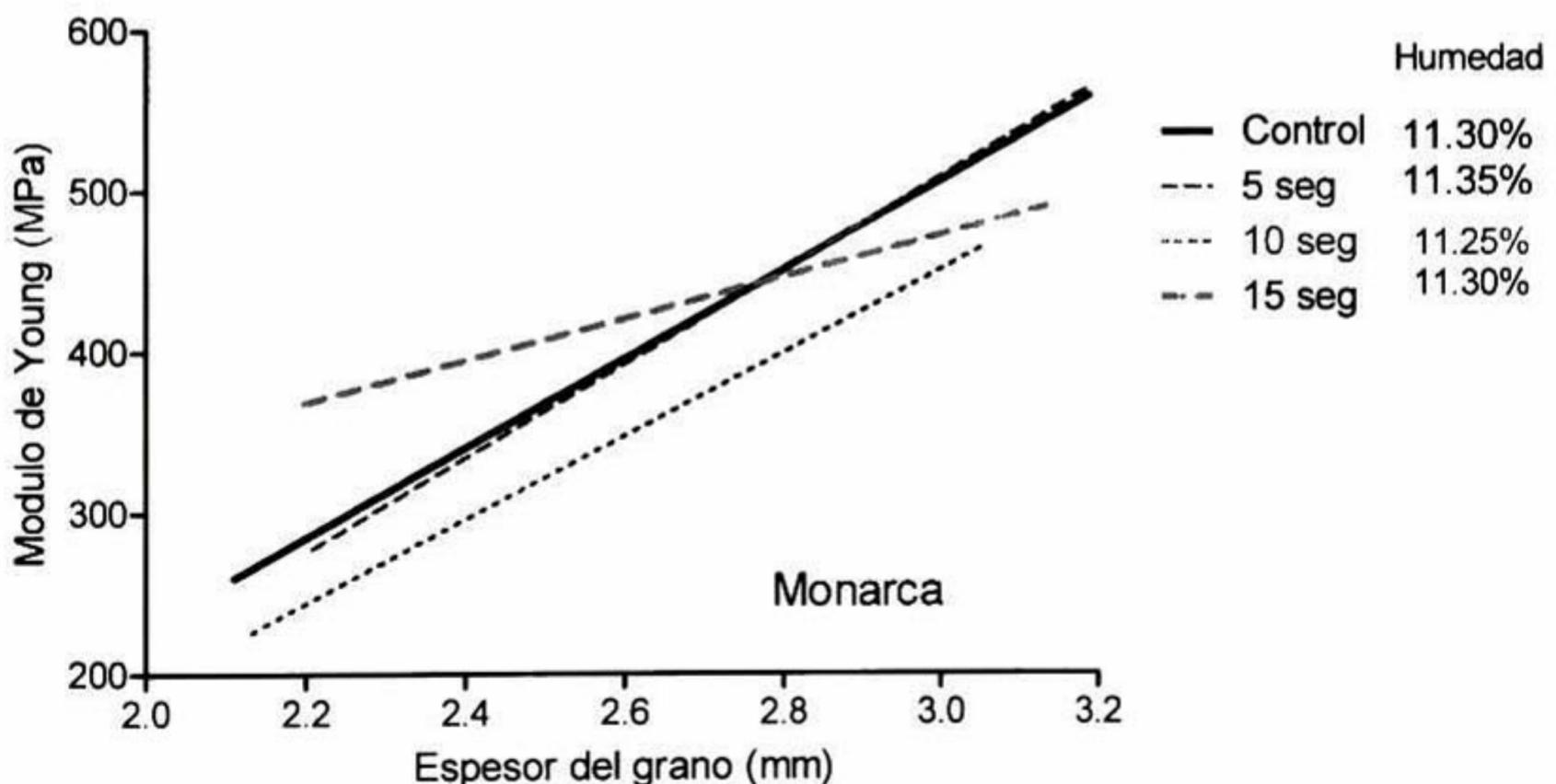


Figura 23. Efecto de la irradiación de microondas en el módulo de elasticidad en trigo (variedad Monarca.)

Este hecho es muy importante ya que indica que los granos pequeños son menos elásticos o de menor calidad y son estos los que pudieran ser afectados de una mejor manera con el tratamiento de microondas.

La Figura 23, muestra que para la variedad Monarca los tratamientos de irradiación con microondas fueron más efectivos para incrementar el módulo de elasticidad en los granos de menor espesor (2.2 m a 2.7mm). Las diferencias fueron de hasta 100 MPa de incremento de elasticidad a 15 seg de tratamiento en los granos pequeños comparados con el control. Los granos grandes no presentaron diferencias significativas por el efecto del tiempo de radiación. Por otra parte para este ejemplo el tratamiento de 10 seg de irradiación con microondas disminuyó la suavidad del grano comparado con el Control. Tratamientos más prolongados (15 seg) como se indicó incrementaron el módulo de elasticidad del grano.

En la Tabla 11 se observa que las variedades panaderas Monarca y Josecha tienen los valores más altos para el esfuerzo, no existiendo diferencias significativas entre ellas; Josecha presentó el mayor módulo de elasticidad con 446 MPa, seguido de Monarca con 413 MPa. Por último la variedad Gemma es la que menor oposición presentó a la deformación ya que su módulo de Young es entre 40 y 35% menor que Josecha y Monarca respectivamente. En cuanto a la deformación unitaria, a penetración constante de 0.5 mm, las variedades Monarca y Josecha no presentan diferencias significativas, siendo menor en Gemma en alrededor de 2%.

Tabla 11. Propiedades mecánicas de las variedades analizadas ($v=0.1$ mm/s, 0.5 mm)

Variedad	Humedad (%)	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)	Módulo (MPa)
Monarca (I)	11.3	75.7 a	18.6 a	413 b
Josecha (I)	11.4	80.2 a	18.2 a	446 a
Gemma (V)	10.75	44.1 b	16.4 b	269 c

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤ 0.05)

Las propiedades de la compresión de granos de trigo individuales por tratamiento se presentan en la Tabla 12, donde se observa que el esfuerzo y módulo de elasticidad o de Young fueron menores para el tratamiento de 05 segundos. López Perea (2008) reporta que encuentra una disminución del módulo de elasticidad con 4 segundos y este se vuelve a incrementar con 8 segundos, lo cual coincide de cierta manera con la disminución con la exposición del trigo durante 5 a 10 segundos en la irradiación con microondas para los trigos del presente estudio.

Tabla 12. Efecto del tiempo de irradiación con microondas en las propiedades mecánicas de los trigos evaluados ($v=0.01\text{mm/s}$ 0.5mm)

Tratamiento	Esfuerzo (MPa)	Deformación (%)	Módulo (MPa)
Control	68.8 a	18.1 a	384 a
05 segundos	62.6 b	17.8 ab	348 b
10 segundos	66.3 ab	17.7 ab	378 ab
15 segundos	69.0 a	17.5 b	396 a

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤ 0.05)

En la Figura 24 se muestra el efecto del tiempo de irradiación con microondas sobre el módulo de elasticidad del trigo, y se observa una disminución con 5 segundos, seguido de una tendencia a incrementarse con mayor tiempo de exposición a las microondas. Tal como se esperaba la desviación estándar fue de aproximadamente 50 MPa. Esto lo ilustra de una mejor manera la Figura 23, y Figura 25 explicando que dentro de una misma variedad generalmente los granos pequeños tienen valores muy pequeños de módulo de elasticidad comparado con los valores altos de módulo de elasticidad para granos de mayor tamaño para los mismos tiempos de irradiación de microondas. Por tanto se puede inferir que para obtener incrementos en la elasticidad del endospermo para mejorar la calidad principalmente de trigos suaves se necesita aplicar tratamientos de 15 segundos de irradiación de microondas. Los trigos tenaces y duros presentaron menores cambios o respuesta al tratamiento con microondas

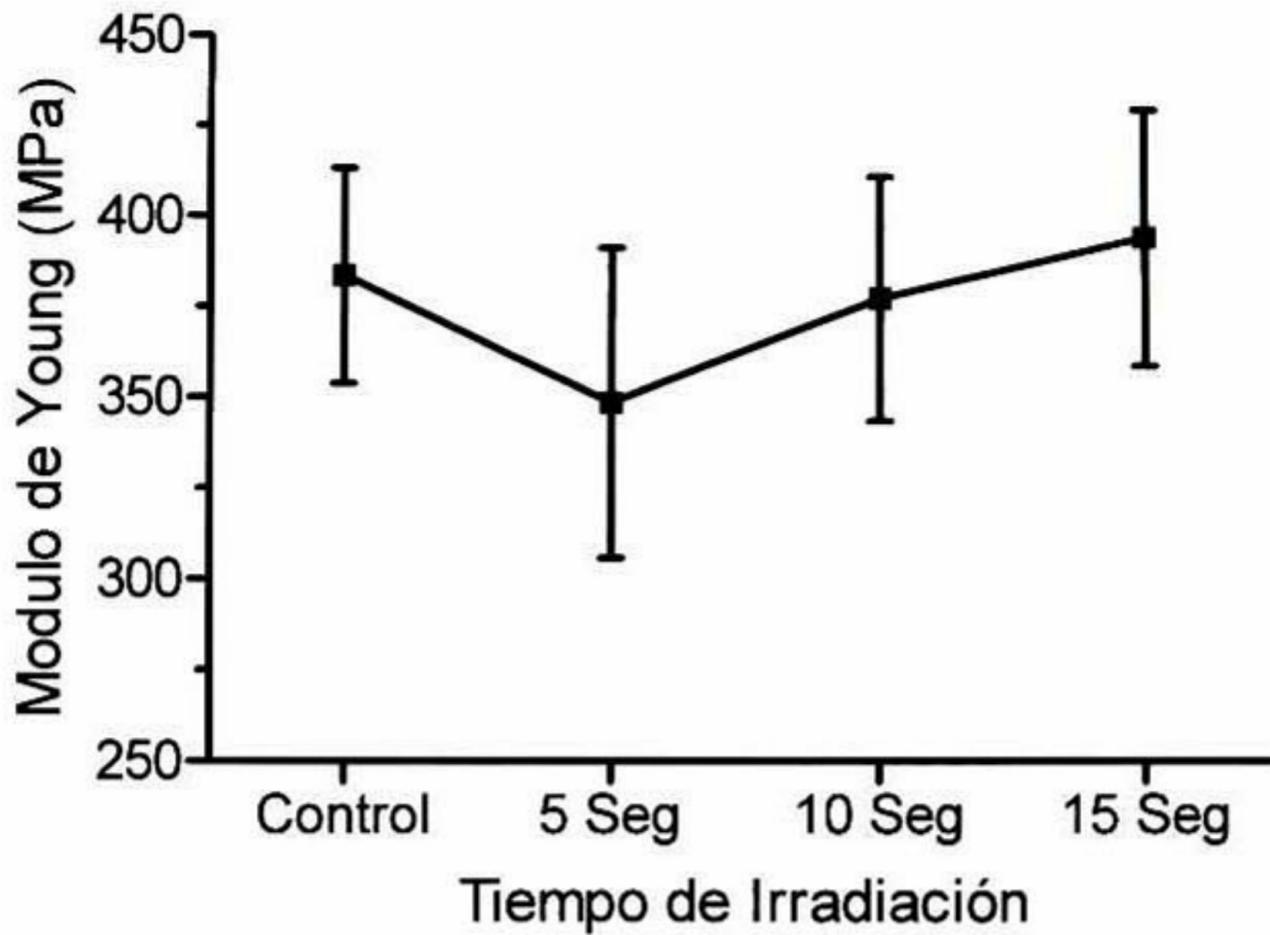


Figura 24 Variación del módulo de elasticidad con respecto al tiempo de irradiación de microondas.

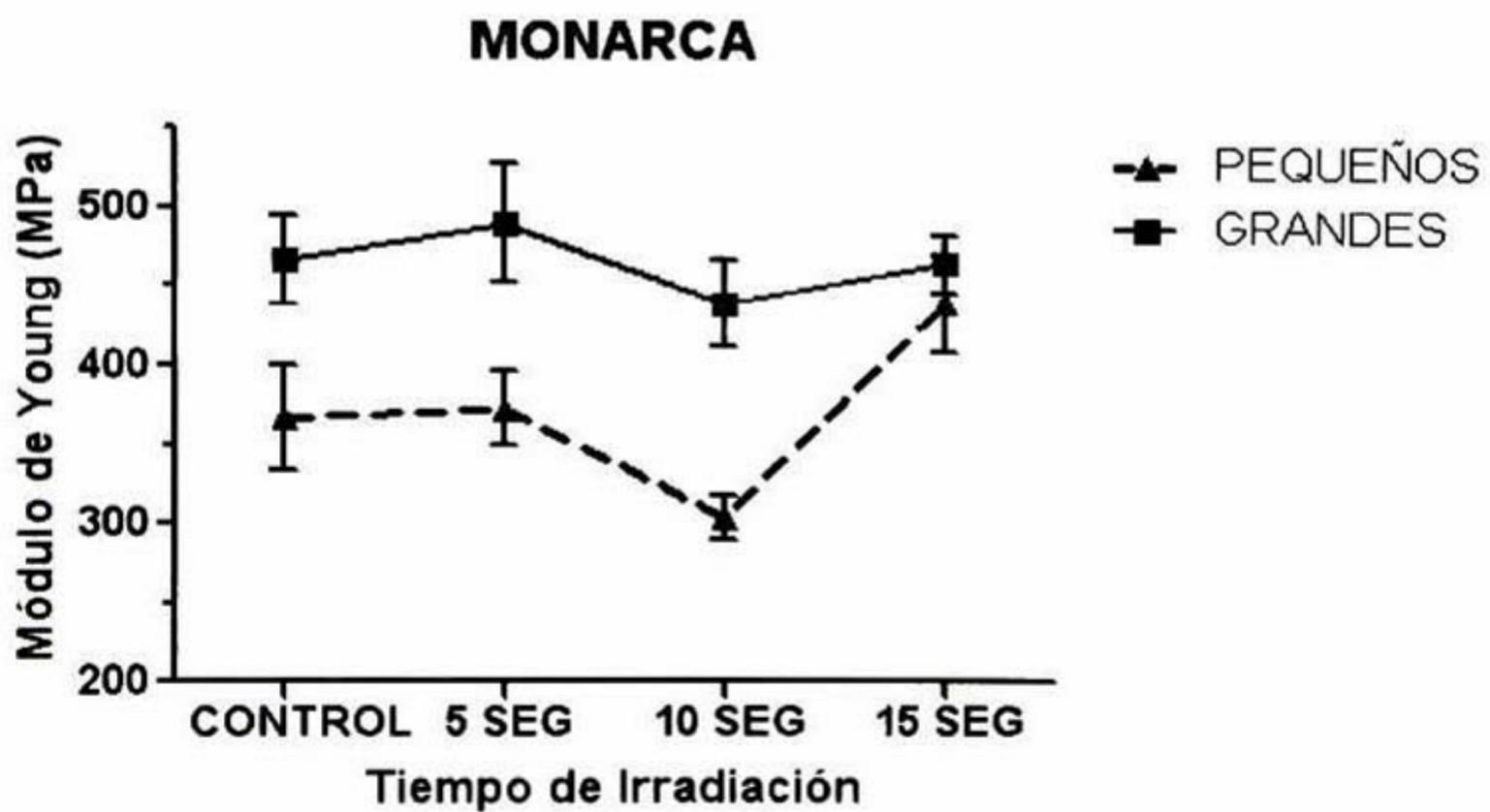


Figura 25. Variación del módulo de elasticidad en diferentes tamaños de grano por efecto de la irradiación de microondas.

En la Figura 25 se observa un mayor efecto del tratamiento de microondas en la variedad Monarca se observa en los granos pequeños (< 3.0 mm) de grosor,

especialmente con tratamientos de 15 seg en los cuales el módulo de elasticidad se incrementa significativamente.

4.4. Propiedades reológicas de la masa

4.4.1. Viscosidad

Para evaluar el posible efecto de la irradiación de microondas sobre los almidones del endospermo de trigo se estudiaron los perfiles de viscosidad (RVA) de suspensiones acuosas las diferentes harinas obtenidas de los granos de trigo irradiados.

Los cambios de la viscosidad por variedad se muestran en la Tabla 13, siendo la viscosidad máxima mayor para Gemma en 11%, la viscosidad final no presenta diferencia significativa, siendo ligeramente mayor la de Gemma, lo anterior, debido a un menor grado de daño del almidón en la molienda.

Tabla 13. Resultados del RVA por variedad (harina humedad base 14%)

Variedad	Viscosidad Máxima en calentamiento (cP)	Viscosidad final (cP)
Monarca	2,618 b	3,563 a
Gemma	2,915 a	3,691 a

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤ 0.05)

En la Tabla 14 se observa que la viscosidad máxima se tiene para el tratamiento de 10 segundos de exposición a microondas, después el control, seguido de 15 segundos, final y estadísticamente más pequeño el valor correspondiente a 05 segundos, que es 13% menor que el obtenido con 10 segundos de exposición. Como se esperaba, para la viscosidad final, se tiene que el control tiene el mayor valor, y es fue 3,752 centipoises, mientras que 10 y 15 segundo ocupan los segundos valores intermedios, y el tratamiento de 05 segundos es el de menor

valor, siendo 10% menor que el control, esta disminución pudiera ser deseable, ya que generalmente se ha asociado a una mayor vida de anaquel. Sin embargo, los cambios por el tratamiento de microondas fueron muy pequeños. MaCartur et al., (1981) reportó cambios mínimos en los perfiles de viscosidad aún después de 360 seg de exposición por lo que se puede deducir que los mayores cambios conformacionales pudieran darse a nivel proteína y no en los almidones. Se han reportado cambios mínimos en los perfiles de viscosidad aún después de 360 seg de exposición (MacArthur y D'Appolonia 1981) por lo que se puede deducir que los mayores cambios conformacionales pudieran darse a nivel proteína y no en los almidones.

Tabla 14. Cambios en la viscosidad por efecto de la irradiación con microondas en los trigos analizados.

Tratamiento	Viscosidad Máxima en calentamiento (cP)	Viscosidad final (cP)
Control	2,877 a	3,752 a
05 segundos	2,526 b	3,379 b
10 segundos	2,893 a	3,734 ab
15 segundos	2,769 a	3,643 ab

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤ 0.05)

4.4.2. Evaluación de la calidad reológica de las masas de trigo irradiado con microondas utilizando el alveógrafo de Chopin

En la Tabla 15, se puede observar los principales parámetros reológicos de los diferentes trigos sin el tratamiento de microondas. Los trigos Monarca y Josecha son los que presentan una mayor tenacidad, incluso que el Gemma, cuando se relaciona con la relación P/L, se observa que se trata de un trigo cristalino. Los de menor tenacidad son Tacupeto y Salamanca, los cuales son de gluten suave. En cuanto a la extensibilidad Monarca y Josecha, son los que presentaron mayores valores, lo cual coincide que los trigos de mejor calidad y cantidad de proteína

(Martínez-Cruz et al. 2007) son los más extensibles , seguido de salamanca que es una variedad suave, después viene Tacupeto, que también es suave, por último la variedad Gemma, que es del género *durum*.

La relación P/L, es mayor para Gemma, que es cristalino, después Tacupeto (III) seguido de Monarca y Josecha que pertenecen al grupo I, el índice de expansión sigue la misma tendencia que la extensibilidad, siendo el de mayor valor Monarca y el menor Gemma.

Tabla 15. Parámetros reológicos de las masas de las variedades de trigo analizadas.

Variedad	Tenacidad (mm)	Extensibilidad (mm)	Relación P/L	Índice de hinchamiento	Superficie (mm ²)	Trabajo (x 10 ⁻⁴ J)
Tacupeto	93.7 a	84.2 c	1.1 b	20.4 c	40.7 c	266 c
Salamanca	73.3 b	90.5 b	.8 c	21.2 c	28.9 e	189 e
Monarca	98.3 a	124.8 a	.8 c	24.8 a	69.9 a	457 a
Josecha	101.6 a	111 b	0.9 c	23.5 b	63.4 b	415 b
Gemma	97.1 a	72.6 d	1.4 a	19.0 d	33 d	216 d

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤0.05)

^b: Los análisis se realizaron con harina a una humedad base de 15%

La superficie del alveograma, y de la misma manera el trabajo de deformación es mayor para Monarca, seguido de Josecha, Tacupeto Gemma y por último Salamanca.

Respecto al efecto del tiempo de irradiación sobre la tenacidad de la masa, se puede observar en la Figura 26, que en la mayoría de los tipos de trigo se presenta un incremento significativo de la tenacidad con el incremento del tiempo de irradiación especialmente 15 segundos, exceptuando la variedad Josecha. Esto puede ser de mucha importancia para mejorar la calidad reológica y de amasado de los trigos destinados para la elaboración de pan, en especial para los suaves y también para los trigos duros o cristalinos empleados para elaborar pastas que requieren mayor tenacidad para producir una mejor calidad.

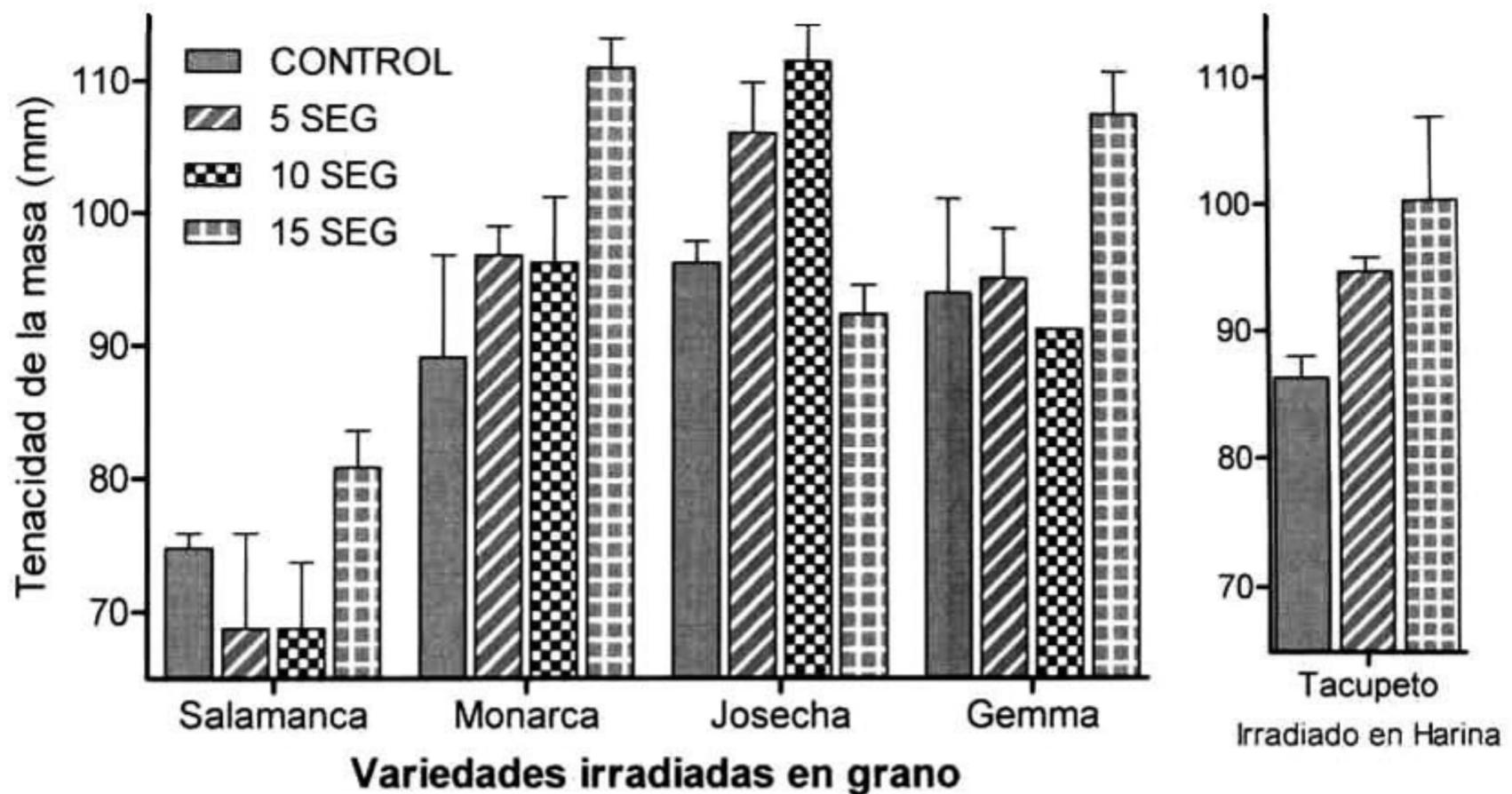


Figura 26. Efecto del tiempo de irradiación con microondas sobre la tenacidad de la masa.

Tabla 16. Promedio general del efecto de irradiación con microondas evaluados con el alveógrafo de Chopin.

Tratamiento	Tenacidad (mm)	Extensibilidad (mm)	Relación P/L	Índice de hinchamiento	Superficie (mm ²)	Trabajo (x 10 ⁻⁴ J)
Control	88.1 b	100.8 a	0.93 b	22.2 a	47.1 a	308 a
05 segundos	92.3 ab	97.4 a	0.99 ab	21.9 a	46.8 a	306 a
10 segundos	92.0 ab	98.6 a	0.95 b	22.0 a	48.3 a	316 a
15 segundos	98.5 a	92.5 a	1.12 a	21.3 a	48.0 a	314 a

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤0.05)

^b: Los análisis se realizaron con harina a una humedad base de 15%

En general, se puede apreciar en la Tabla 16, que en promedio las variedades mostraron diferencias significativas con el control en Tenacidad y la relación P/L. Incrementándose estos valores especialmente en el tratamiento con 15 seg.. La mayor tenacidad se tiene para 15 segundos de irradiación de microondas, con valor de 98.5; los tratamientos de 05 y 10 segundos no presentan diferencias

significativas con la prueba de Duncan; los trigos no irradiados son los que presentaron menor tenacidad. Estos datos concuerdan con los pocos estudios de irradiación de microondas realizados en trigo en los que P/L se incrementa y el trabajo disminuye con el tiempo de irradiación de microondas (Campaña *et al.* 1993, MacArthur y D'Appolonia 1981). Sin embargo los anteriores autores utilizaron microondas como medio de secado de grano y los tiempos fueron de 0, 1.5 2 y 2.5 min en el caso de Campaña, *et al.* (1993); y MacArthur *et al.* (1991) hasta 4 minutos para observar cambios bioquímicos. MacArthur *et al.* (1991) reportó que cierto grado de deterioro se presentó hasta los 240 seg de exposición.

En cuanto a la extensibilidad e índice de hinchamiento no se presentaron diferencias significativas, aunque sí presentó una tendencia a disminuir cuando mayor es el tiempo de exposición a las microondas. Dada estas 2 tendencias de L y P, la relación P/L tiene el mismo comportamiento de incrementarse conforme aumenta el tiempo de irradiación de los trigos, siendo los más altos el de 15 y 5 segundos.

En lo que a la superficie del alveograma y trabajo de deformación, aunque no se aprecian diferencias significativas, los tratamientos con 10 y 15 segundos presentan una tendencia a ser mayores que el control y 05 segundos.

En las diferentes gráficas de la Figura 27, se observa que la tendencia general, es a incrementarse la relación tenacidad / extensibilidad de las diferentes variedades de trigo irradiados, tal como se había comentado la Tabla 16, solo en el caso de la variedad Josecha se obtuvo una disminución, asimismo los menores valores son para los controles.

Para el caso de la variedad Tacupeto que es de gluten suave, también mostró una tendencia similar, siendo de 86 mm para el control, 94 mm para el tratamiento de 10 segundos, y finalmente de 100 mm con 15 seg de irradiación de microondas.

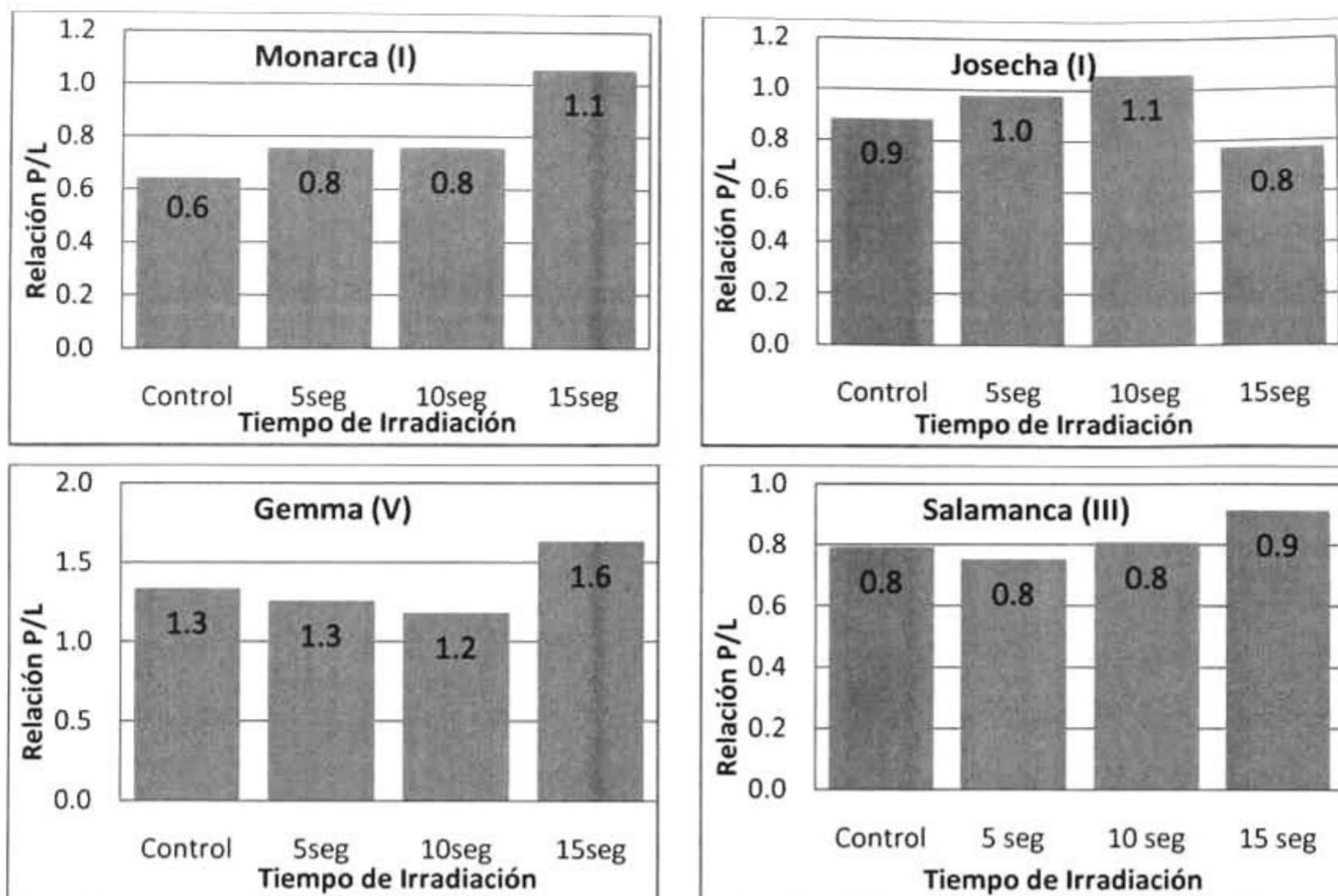


Figura 27. Cambio en la relación P/L de las diferentes variedades de trigo a diferentes tiempo de irradiación de microondas

De una manera más ilustrativa se puede revisar los alveogramas tipo de la variedad monarca en laFigura 28, donde se observa que a mayores tiempos de exposición, se tienen mayor tenacidad, menos extensibilidad, y la relación P/L aumenta, lo cual puede atribuirse a cambios en la conformación de las proteínas y al incremento de almidón dañado (Dexter et al. 1994), esto puede ser de beneficio para la panificación, ya que la red que atrapa el gas, será más fuerte.

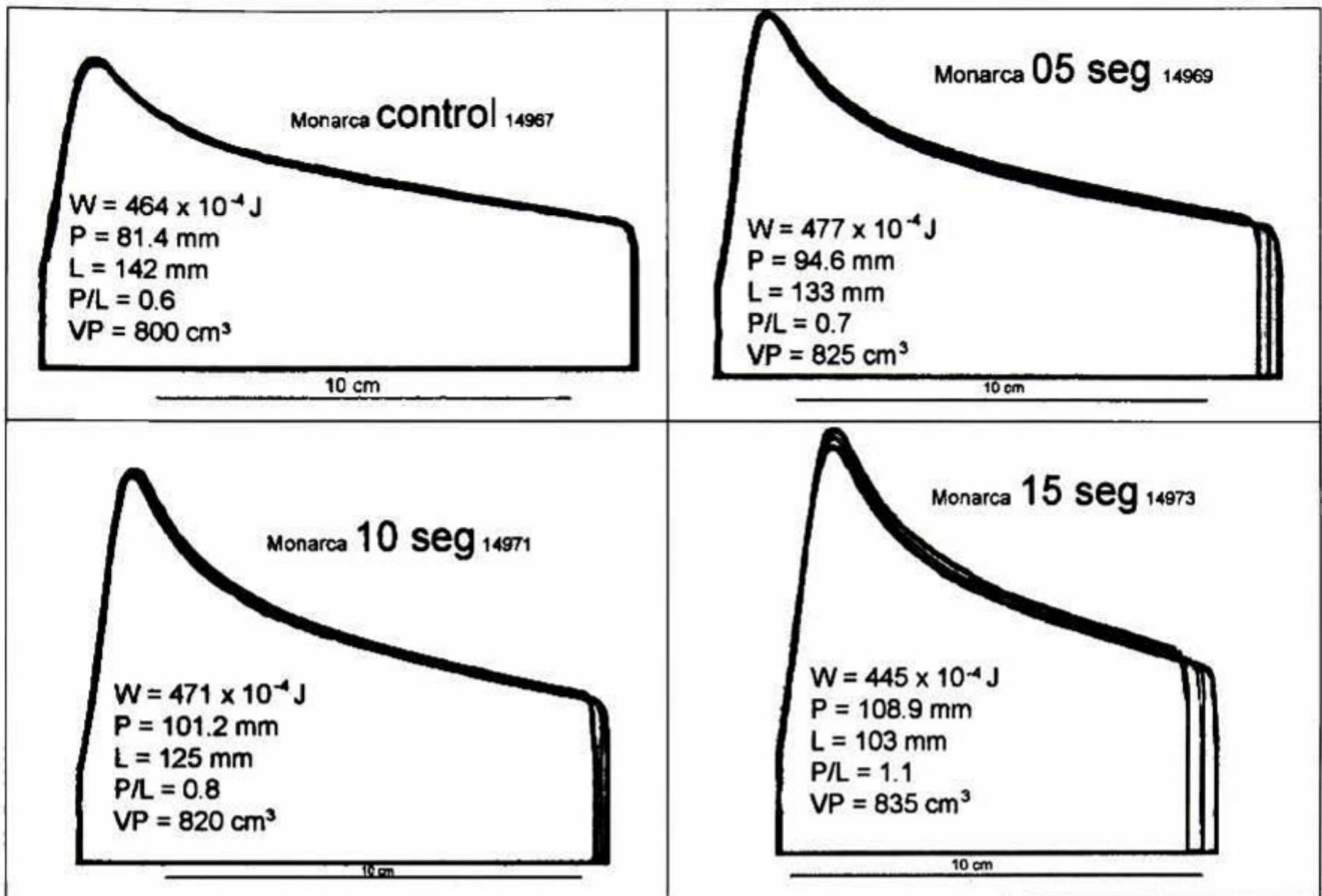


Figura 28. Alveogramas tipo de trigo variedad Monarca con los diferentes tiempos de irradiación de microondas.

Para explicar algunos posibles cambios en la conformación de las proteínas del trigo por efecto de la irradiación con microondas, se acondicionaron varias harinas obtenidas de las muestras irradiadas y se les determinó la reflectancia difusa por medio de DRIFT's. Figura 29, ilustra un espectro de DRIFT para la variedad Monarca, que indica algunos cambios inducidos a la proteína del trigo por efecto de la irradiación del microondas. Sin embargo, estos efectos localizados principalmente en las bandas $1500\text{-}1700\text{ cm}^{-1}$ se relacionan a cambios de interacciones proteína carbohidratos y cambios conformacionales de las proteínas. El espectro de la Figura 29 muestra dos bandas una entre $1600\text{ a }1700\text{ cm}^{-1}$ y otra entre $1500\text{ a }1550\text{ cm}^{-1}$ reportados como amida I y amida II, respectivamente (Byaruhanga et al. 2006, Duodu et al. 2001, Robertson et al. 2006). En el rango de $1650\text{-}1658\text{ cm}^{-1}$ de amida I y $1545\text{-}1547\text{ cm}^{-1}$ han sido asignados principalmente a la alfa-hélice de las proteínas (Byler y Susi 1986) por la interacción del C=O con puentes de hidrógeno y agua, que en este caso

específico a 15 seg de irradiación alcanza un máximo nivel con posibles beneficios en la calidad.

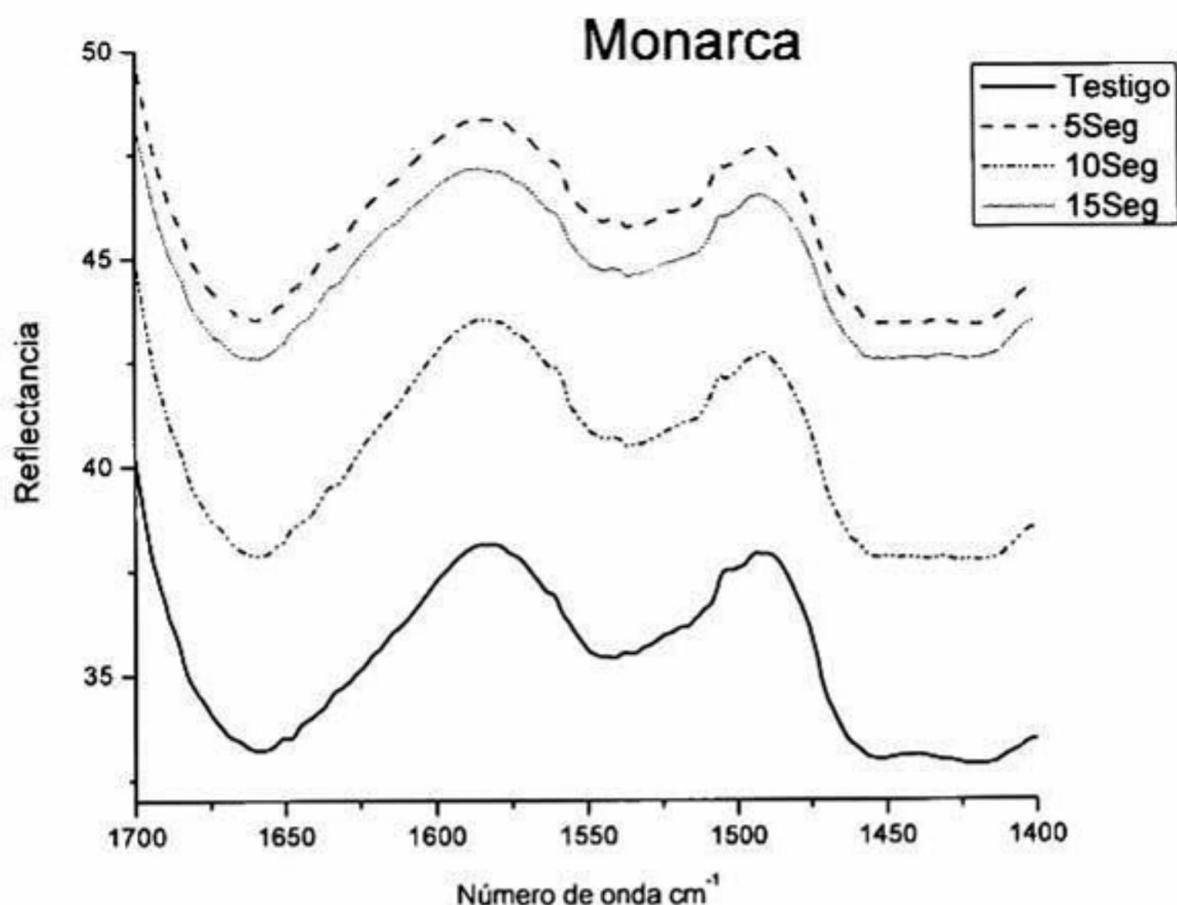


Figura 29. Detalles de los cambios en amida I y II de las proteínas por efecto de la irradiación con microondas.

4.5. Calidad panadera

En lo que se refiere a la calidad panadera, en las Tabla 17 y 18 se observa que las variedades Monarca y Josecha (ambas pertenecientes al grupo I) son las que presentan el mayor volumen de pan, además presentaron una miga homogénea y bien formada, ocupan el mayor tiempo de amasado, tienen absorción arriba de 77% para panificación, y cuentan con mayor cantidad proteína que los trigos suaves estudiados. Gemma les sigue en cuanto al volumen de pan, aunque presentó una calidad de la miga regular de color crema. Finalmente los menores volúmenes de pan los tienen Salamanca y Tacupeto, que son las variedades de menor cantidad de proteína y de tipo gluten suave y extensible tal como lo reporta la bibliografía (Peña *et al.* 2007, Solís y Ríos 2007), de acuerdo a la clasificación por tipo de gluten.

Tabla 17. Calidad panadera de las variedades de trigo analizadas

Variedad	Proteína Harina (%)	Absorción (%)	Amasado (min)	Peso de Pan (g)	Volumen de pan (cm ³)
Salamanca	9.9 d	65 e	3.1 e	148.2 c	683.8 c
Josecha	11.8 c	77.2 c	7.0 b	151.1 b	793.8 b

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤ 0.05)

^b: Los análisis se realizaron con harina a una humedad base de 14%

Entre tratamientos no se lograron observar cambios en lo que se refiere al color y homogeneidad de la miga.

Tabla 18. Color y calidad de la miga del pan de las variedades analizadas.

Variedad	Color de la miga	Homogeneidad
Salamanca	Crema	Regular
Josecha	Blanca	Buena

Por comparación visual con testigo panadero (variedad Avelino)

En relación al efecto de los tratamientos hechos al trigo con irradiación de microondas sobre el volumen de pan, en la Tabla 19, se puede observar que los mayores volúmenes de pan se presentan en los tiempos de exposición a microondas de 10 y 15 segundos, con esa tendencia, aunque estadísticamente no diferentes. Se presenta además una disminución del volumen con 5 segundos de irradiación. Con 10 segundos se tuvo 753 cm³ de pan, y su diferencia con respecto al control con 737 cm³. En lo que se refiere al peso de pan a 10 segundos se tuvo un mayor peso, seguido de 15, 05 segundos y finalmente el control fue el de menor peso.

Tabla 19. Cambios en la calidad panadera por efecto de la irradiación con microondas en las variedades analizadas.

Tratamiento	Temperatura (°C)	Absorción (%)	Amasado (min)	Peso Pan (g)	Volumen Pan (cm ³)
05 segundos	31.2 c	73.8 b	5.0 b	149.8 ab	718 b
15 segundos	49.7 a	73.6 b	5.2 ab	150.3 ab	746 a

^a: medias seguidas con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Duncan, ≤ 0.05)

^b: la temperatura se refiere a la alcanzada por los granos de trigo durante la irradiación a las microondas.

^c: Los análisis se realizaron con harina a una humedad base de 15%

De acuerdo al comportamiento del volumen del pan por efecto del tiempo de irradiación con microondas, se muestra en la Figura 30, que aunque se pueden observar claras tendencias, los cambios en los trigos no fueron lo suficientemente grandes debió posiblemente a que no se seleccionaron trigos con tipo de gluten débiles para favorecer de mejor manera cambios en la tenacidad de sus masas. Como se discutió anteriormente, el incremento de volumen de pan con la microondas es posiblemente debido principalmente a cambios en la conformación de la proteína, y en menor grado a un posible daño del almidón (Dexter *et al.* 1994, MacArthur y D'Appolonia 1981), que en cantidades adecuadas, favorece la absorción de agua, la actividad de las enzimas y por lo tanto de las levaduras. Reducciones en los enlaces de hidrógeno en la estructura alfa-hélice de las proteínas hacer más fuerte los enlaces entre las proteínas que forman la macromolécula del gluten, también puede sugerirse, de acuerdo a los datos analizados.

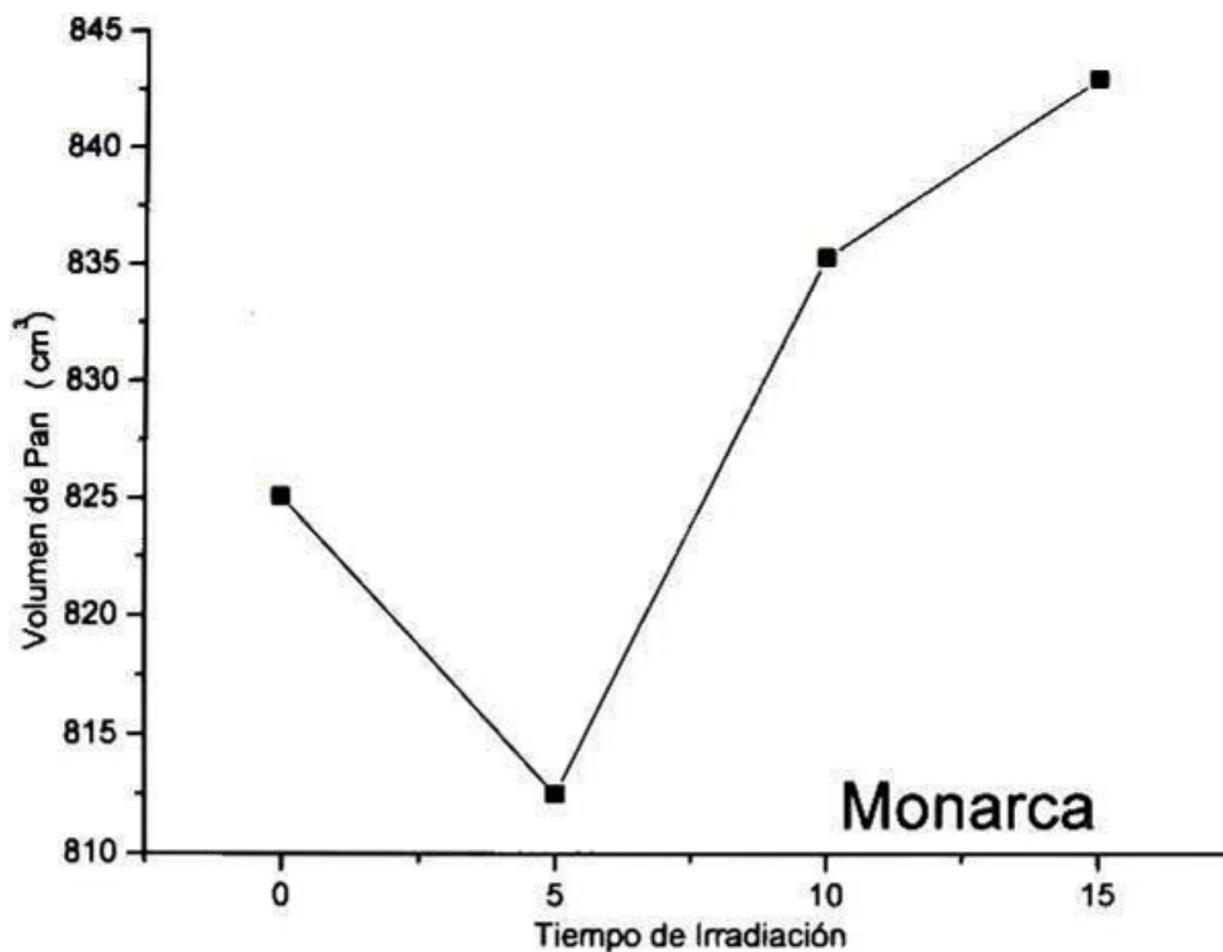


Figura 30. Perfil típico esperado del cambio de volumen de pan, a diferentes tiempos de irradiación de microondas (variedad Monarca).

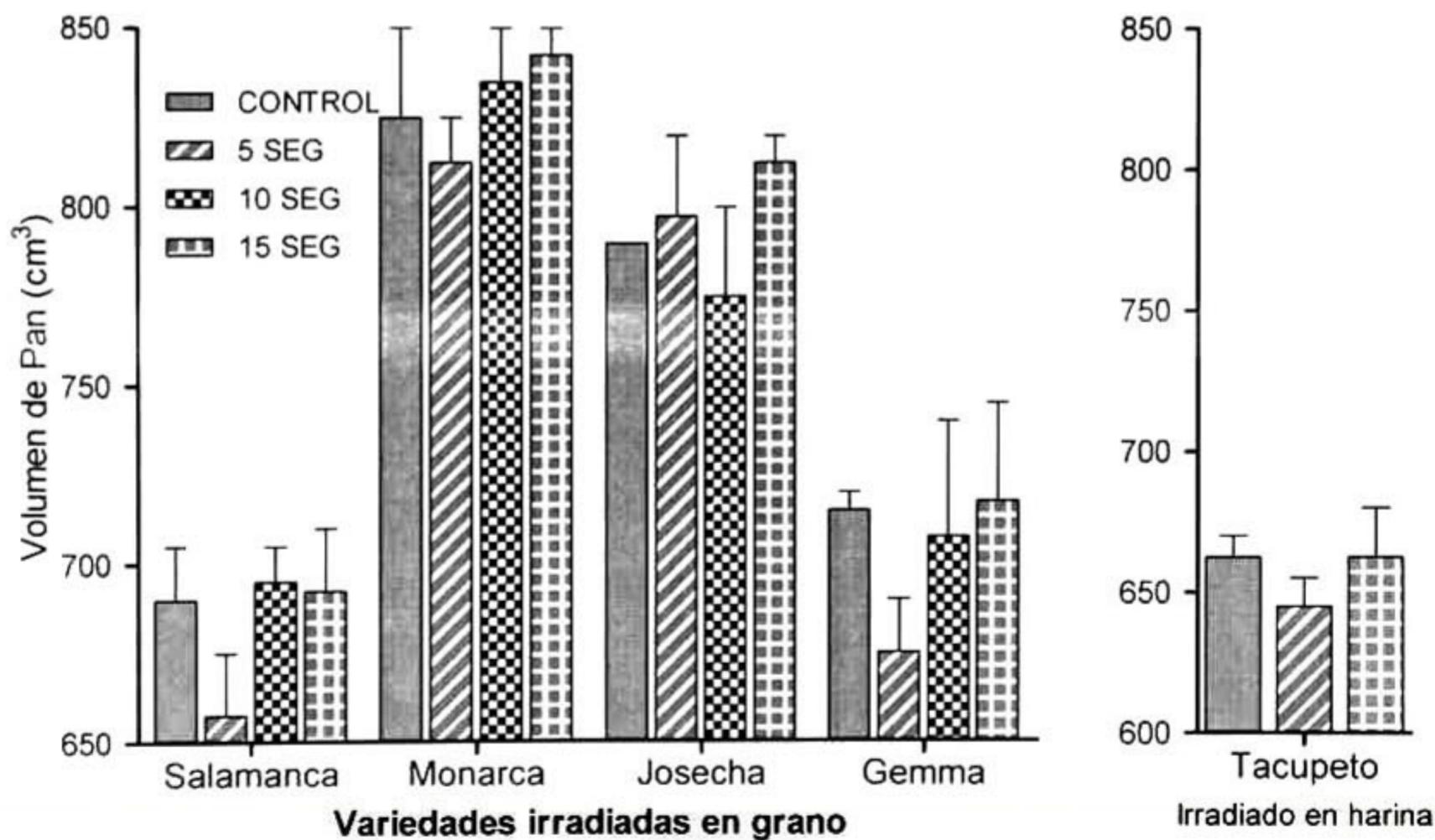


Figura 31. Efecto de la irradiación de microondas sobre el volumen de pan de las variedades de trigo analizadas.

En la Figura 31 se observa el efecto de la irradiación de microondas sobre el volumen de pan de las variedades analizadas, siendo las variedades panaderas las que mejor respondieron a este efecto, específicamente con 15 segundos de exposición a las microondas. La mayoría de las variedades presentan una disminución en el volumen de pan con 5 seg de irradiación de microondas, salvo Josecha que se incrementó con 10 seg de exposición.

4.6. Correlaciones entre las variables analizadas

La calidad del trigo tiene tres aspectos importantes. La calidad del grano la cual indica la sanidad y propiedades del grano para la molienda, está definida por el peso hectolítrico, dureza, cenizas y rendimiento harinero, y es importante para asegurar un buen rendimiento de la molienda. La calidad reológica de las masas es importante desde el punto de vista de manejo durante el procesamiento, y uso que se le dará a la harina. La calidad de panificación definida por la absorción de agua, aunque principalmente por el volumen de pan y calidad de la miga. El efecto del tiempo de irradiación sobre estas variables se discutieron en las secciones anteriores. Sin embargo, en esta parte se evalúan por medio de correlaciones el efecto y la interrelación que los tratamientos de microondas tienen sobre la relación de dichas variables.

En la Tabla 20, se observa las correlaciones de Pearson para diferentes variables analizadas. La variable de volumen de pan, es la tecnológicamente más importante, y también para este estudio, presentó las correlaciones más altas con el porcentaje de proteína 94%; el volumen de sedimentación 88% (Colombo et al. 2008), trabajo del alveógrafo de 87% (Gaido y Dubois 2008), Esto puede atribuirse a los agregados proteicos con el almidón en el endospermo, y su capacidad de formar la red para atrapar el gas (Figueroa 2009; Hosney 1991).

Tabla 20. Correlaciones de Pearson entre las variables respuesta de muestras de trigo.

	PanVol	PTA	PAbs	AMPL	AlvW	AML	Bñ	VM	SDS	Prot
Peso hectolítrico	0.81**	0.81**	n.s.	-0.62**	0.80**	0.76**	n.s.	-0.68**	0.80**	0.75*
Proteína (Prot)	0.94*	0.92	0.96**	n.s.	0.93**	0.83**	0.61**	0.56*	0.84**	
Sedimentación (SDS)	0.88**	0.94**	-0.63**	-0.78**	0.96**	0.89**	n.s.	-0.71**		
Viscosidad Máx (VM)	-0.50	-0.57*	n.s.	0.52*	-0.63**	-0.61*	n.s.			
Alveograma-P (AMP)	0.47**	0.52**	0.68**	0.54**	0.57**	n.s.				
Alveograma-L (AML)	0.75**	0.83**	Ns	-0.77**	0.83**					
Alveograma-W (AlvW)	0.87**	0.98**	0.56**	-0.35*						
Alveograma-P/L (AMPL)	n.s.	-0.37*	Ns							
Pan Absorción (PAbs)	0.64**	0.55**								
Tiempo Amasado (PTA)	0.87**									

*, **, Significativo al 0.05 y 0.01 de probabilidad respectivamente; ns, no significativo

SDS = volumen de sedimentación; AlvP = tenacidad; AlvL = extensibilidad; AlvW = trabajo alveográfico; Pabs = absorción para panificación; PanVol = volumen de pan.

Conclusiones

La temperatura del grano y harina alcanzada por los materiales irradiados fue en promedio 43-48 °C en grano y 55 °C en la harina a 15 seg de irradiación con microondas lo que indica que se tienen materiales sin daño por calor.

En las muestras analizadas se observó que el módulo de elasticidad depende del espesor del grano, siendo los de mayor tamaño los que tienen un mayor módulo de elasticidad, aunque en los trigos cristalinos la variación es menor.

Los granos de trigo pequeños (2.2 mm a 2.7 mm) son menos elásticos o de menor calidad que los grandes (>3.0 mm) y son estos los que pudieran ser afectados de una mejor manera con el tiempo de 15 seg de irradiación con microondas.

La viscosidad máxima medida en el RVA, así como la viscosidad final, fueron menores para el tratamiento de 05 segundos.

Se observó en la mayoría de los tipos de trigo un incremento significativo de la tenacidad con el incremento del tiempo de irradiación especialmente 15 seg. Esto puede ser de mucha importancia para mejorar la calidad reológica y de amasado de los trigos suaves y también panaderos destinados principalmente a la elaboración de pan; también para los trigos duros o cristalinos utilizados en la elaboración de pastas que requieren mayor tenacidad para producir una mejor calidad.

Se observa que la tendencia general, tiende a incrementarse al igual que la relación tenacidad / extensibilidad de las diferentes variedades de trigo irradiados.

La reflectancia difusa por medio de DRIFTS mostró algunos cambios inducidos a la proteína del trigo por efecto de la irradiación del microondas. Estos cambios se dan principalmente en el rango de 1650-1658 cm^{-1} para la amida I y 1545-1547 cm^{-1} para la amida II; los cuales han sido asignados principalmente a la alfa-hélice de las proteínas por la interacción del C=O con enlaces de hidrógeno y agua, que en

este caso específico a 15 seg de irradiación alcanza un máximo nivel con posibles beneficios en la calidad.

El efecto del tratamiento de microondas mostró tendencias importantes a incrementar el volumen del pan especialmente en trigos suaves. Los mayores volúmenes de pan se presentan en los tiempos de exposición a microondas de 10 y 15 segundos. Se presentó también una disminución del volumen con 5 segundos de irradiación.

Aunque hubo diferencias favorables en el volumen de pan por el efecto de del tratamiento con microondas los cambios en los trigos no fueron lo suficientemente grandes debido posiblemente a que no se seleccionaron trigos con tipo de gluten suaves para favorecer de mejor manera cambios en la tenacidad de sus masas.

Para el objetivo del presente trabajo, que es evaluar el efecto de las microondas en las propiedades reológicas, se observó aumento en la tenacidad de los trigos, siendo el tratamiento con 15 segundos de exposición a los microondas el de mayor efecto; la extensibilidad presentó una tendencia a disminuir, aunque no de manera significativa, con base a estos 2 parámetros, la relación tenacidad extensibilidad, también se vio incrementada. El trabajo de deformación del alveógrafo no presenta cambios significativos, aunque sí una tendencia a incrementarse con el tiempo de exposición a las microondas.

En cuanto a la calidad panadera, ésta se vio mejorada para 10 y 15 segundos con incremento en el volumen de pan.

Perspectivas

Se plantea continuar con las pruebas experimentales, analizando mayores tiempos de exposición, para conocer su efecto en el rendimiento del pan.

Se puede además seleccionar variedades con cantidad de proteína adecuada (menor de 11%), y con baja tenacidad, para conocer su comportamiento a los tratamientos con microondas para panificación, e incluso trigos cristalinos para calidad de pasta.

Otro punto importante, es evaluar la vida de anaquel del pan irradiado con microondas, desde el punto de vista del endurecimiento y microbiológico.

Bibliografía

AACC-International. 1995. Approved methods of American Association of Cereal Chemists. AACC International, St. Paul, MN, E.U.A.

Agúndez-Arzivu, Z., Fernández, M. V. R., Arce, M. E. C., Cruz, E. Z., Meléndez, R., Chernov, V. y Barboza, M. F. 2006. Gamma radiation effects on commercial mexican bread making wheat flour. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research 245:455-458.

Anjum, F. M. y Walker, C. E. 1991. Review on the significance of starch and protein wheat kernel hardness. J. of the Sci. of Food and Agric. 56:1-13.

ASAE. 2003. Compression test of food materials of convex shape in: ASAE S368.4 DEC00. ASAE, ed. American Society of Agricultural Engineers, St. Joseph, MI, USA.

Aykroyd, W. R. y Doughty, J. 1970. El trigo en la alimentación humana. FAO, Roma, Italia.

Belitz, H.-D. y Grosch, W. 1997 Química de los alimentos. ACRIBIA, S.A., Zaragoza, España.

Bergale, P. C. y Irudayaraj, J. 1995. Mechanical strength and rheological behavior of barley kernels. I. J. of Food Sci. and Tech. 30:609 - 623.

Brown, T.-L., Lemay, H.-E., Bursten, B.-E. y Burdge, J. R. 2004. Química la ciencia central. Pearson Educación, México, D.F

Byaruhanga, Y. B., Emmambux, M. N., Belton, P. S., Wellner, N., Ng, K. G. y Taylor, J. R. N. 2006. Alteration of kafirin and kafirin film structure by heating with microwave energy and tannin complexation. J. Agric. Food Chem. 54:4198 - 4207.

Byler, D. M. y Susi, H. 1986. Examination of the secondary structure of proteins by deconvolved FTIR spectra. Biopolymers 25:469 - 487.

Campaña, L. E., Sempe, M. E. y Filgueira, R. R. 1993. Physical, chemical, and baking properties of wheat dried with microwave energy. Cereal Chem. 70:760 - 762.

Campaña, L. E., Sempé, M. E. y Filgueira, R. R. 1986. Effect of microwave energy on drying wheat. Cereal Chem. 63:271 -273.

CANIMOLT. 2008. Página Oficial de la Cámara Nacional de la Industria Molinera de Trigo. Canimolt, México, D.F

Carpanta, O. M. 1998. Caracterización de la calidad del trigo (*Triticum aestivum*) de temporal en tres regiones del Estado de México in: Ingeniería Agroindustrial. Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, México.

Carter, B. P., Morris, C. F y Anderson, J. A. 1999. Optimizing the SDS sedimentation test for end-use quality selection in a soft white and club wheat breeding program. *Cereal Chem.* 76:907-911.

Colombo, A., Ribotta, P. D. y León, A. E. 2008. Aplicación de electroforesis capilar para la caracterización de gliadinas de trigos argentinos. Pages 57-64 in: Agriscientia. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Day, L., Augustin, M. A., Batey, I. L. y Wrigley, C. W. 2006. Wheat gluten uses and industry needs. *Trends in Food Science & Technology* 17:82-90.

De-la-O, M. O., Espitia, E. R., Molina, J. D. G., Peña, R. J. B., Santacruz, A. V. y Villaseñor, H. E. M. 2006. Efecto de diferentes alelos de gluteninas de alto peso molecular sobre las propiedades viscoelásticas de la masa de trigos panaderos. *Agrociencia* 40:461-469.

Department of Physics and Astronomy, G. S. U. 2006. HyperPhysics, Atlanta, Georgia, US.

Dexter, J. E., Preston, K. R., Martin, D. G. y Gander, E. J. 1994. The effects of protein content and starch damage on the physical dough properties and bread-making quality of canadian durum wheat. *J. of Cereal Sci.* 20:139-151.

Dobraszczyk, B. J. y Morgenstern, M. P. 2003. Rheology and the breadmaking process. *J. of Cereal Sci.* 38:229-245.

Dobraszczyk, B. J., Whitworth, M. B., Vincent, J. F. V. y Khan, A. A. 2002. Single kernel wheat hardness and fracture properties in relation to density and modelling of fracture in wheat endosperm. *J. of Cereal Sci.* 35:245 - 263.

Duodu, K. G., H.Tang, Grant, A., Wellner, N., Belton, P. S. y Taylor, J. R. N. 2001. FTIR and solid state ¹³C NMR spectroscopy of proteins of wet cooked and popped and maize. *J. Cereal Sci.* 33:261 - 269.

Espitia, E. R., Martínez, E. C., Peña, R. J. B., Villaseñor, H. E. M. y Huerta, J. E. 2007. Polimorfismo de Gluteninas de alto peso molecular y su relación con trigos harineros de temporal. *Agricultura Técnica en México* 34:57-67

- Ewart, J. A. D. 1977. Re-examination of linear glutenin hypothesis. *J. Sci. Food Agric.* 28:191-199.
- FAO. 2009. FAOSTAT in: Anual.
- Figueroa, J. C., Maucher, T., Reule, W. y Peña, R. J. 2009. Influence of high molecular weight glutenins on viscoelastic properties of intact wheat kernel and relation to functional properties of wheat dough. *Cereal Chem.* 86:139-144.
- Gaido, Z. A. y Dubois, M. E. 2008. Influencia del estrés térmico en la calidad panadera del trigo: progenies con diferentes niveles de sensibilidad. Pages 89-96 in: *Agriscientia*. Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.
- Gates, F. K. y Dobraszczyk, B. J. 2004. Mechanical properties of oats and oats products. *Agric. Food Sci.* 13:113 - 123.
- Greenwood, C. T. y Ewart, J. A. D. 1975. Hypothesis for the structure of glutenin in relation to rheological properties of gluten dough. *Cereal Chem.* 52:146r - 153r.
- Greffeuille, V., Abecassis, J., Rousset, M., Oury, F., Faye, A., L'Helgouac'h, C. y Lullien-Pellerin, V. 2006. Grain characterization and milling behavior of near-isogenic lines differing by hardness. *Theor. Appl. Genet.* 14:1 - 12.
- Heldman, D. R. y Lund, D. B. 2007. *Handbook of food engineering*. Taylor & Francis Group, Boca Raton, Florida, US.
- Hoseney, R. C. 1991. *Principios de ciencia y tecnología de cereales*. ACRIBIA, S.A., Zaragoza, España.
- Kaletunç, G. y Breslaur, K. J. 2003. *Characterization of cereals and flours properties, analysis and applications*. Marcel Dekker, Inc., New York, US.
- Kasarda, D. D., Bernardin, J. E. y Nimmo, C. C. 1976. Wheat proteins. Pages 158 - 236 in: *Advances in Cereal Science and Technology Vol. 1*. Y. Pomeranz, ed. Am. Assoc. Cereal Chem., St. Paul, MN.
- Kent-Jones, D. W. y Amos, A. J. 1956. *Química moderna de los cereales*. Aguilar, Madrid, España.
- Kent, N. L. 1987 *Tecnología de los cereales*. Ed. Acribia, España.
- Khraisheh, M. A. M., McMinn, W. A. M. y Magee, T. R. A. 2004. Quality and structural changes in starchy foods during microwave and convective drying. *Food Res. Int.* 37:497 - 503.

Li, Y., Wang, J., Xie, W., Lu, D. y Ding, W. 2008. Physicochemical properties of wheat fractionated by wheat kernel thickness and separated by kernel specific density. *Cereal Chem.* 85:534 - 543.

López-Perea, P., Figueroa-Cárdenas, J. d. D., Sevilla-Paniagua, E., Román-Gutiérrez, A., Reynoso, R. y Martínez-Peniche, R. 2008. Changes in barley kernel hardness and malting quality caused by microwave irradiation. *American Society of Brewing Chemists, Inc.* 66:203-207.

MacArthur, L. A. y D'Appolonia, B. L. 1981. Effect of microwave radiation and storage on hard red spring wheat flour. *Cereal Chem.* 58:53 - 56.

Martínez-Cruz, E., Espitia, E. R., Benítez, I. R., Peña-Bautista, R. J., Santacruz-Varela, A. y Villaseñor-Mir, H. E. 2007 Efecto de gluteninas de alto peso molecular de los genomas A y B sobre las propiedades reológicas y volumen de pan en trigos harineros. *Agrociencia* 41:153-160.

Martínez, E. C., Espitia, E. R., Benítez, I. R., Peña, R. J. B., Santacruz, A. V. y Villaseñor, H. E. M. 2007 El complejo GLI-1/GLI-3 y las propiedades reológicas y volumen de pan de trigos harineros. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30:167-172.

Maucher, T. 2008. Influence of high and low molecular weight glutenin subunits on viscoelastic properties of wheat kernel and their relation to functional properties wheat dough in: *Fachakultät Maschinenbau and Verfahrenstechnik. Hochschule Furtwangen University, Villinge-Schwenningen. Tesis de licenciatura en ingeniería en biotecnología.*

Maucher, T., Figueroa, J. D. C., Reule, W. y Peña, R. J. 2009. Influence of low molecular weight glutenins on viscoelastic properties of intact wheat kernels and their relation to functional properties of wheat dough. *Cereal Chem.* 86:372 - 375.

Morgan, B. C., Dexter, J. E. y Preston, K. R. 2000. Relationship of kernel size to flour absorption for Canada Western Red Spring Wheat. *Cereal Chem.* 77:286 - 292.

Murúa, P. B. 2008. Desarrollo de ésteres de almidón derivatizados y/o convertidos mediante extrusión termoplástica para su aplicación en microencapsulación de aceite esencial de naranja en el proceso de secado por aspersión in: *Materiales. Cinvestav IPN, Querétaro, México.*

Narváez, E. D. G., Figueroa, J. D. C., Taba, S., Castaño, E. T. y Martínez, R. Á. P. 2007 Efecto del tamaño del gránulo de maíz en sus propiedades térmica y de pastificado. *Revista Fitotecnia Mexicana* 30:269 - 277

Nofsinger, G. W., Van-Cauwengerge, J. E., Anderson, R., Bothast, R. J. y Mohamed, A. A. 1980. Preliminary biological evaluation of the effect of microwave heating on high-moisture shelled corn. *Cereal Chem.* 57:373 - 375.

Payne, P. I., Holt, M. L., Jackson, A. E. y Law, C. N. 1984. Wheat storage proteins: their potential for manipulation by plant breeding. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. Ser.* 304:359-361.

Peña, R. J. B., Herrera, P. P., Villaseñor, E. M., Valdez, M. M. G., Lozano, M. A. M. y Gabilondo, R. M. 2007. Calidad de la cosecha de trigo en México ciclo otoño-invierno 2005-2006. Rep. CONASIST: México, D.F.

Pomeranz, Y., Peterson, C. J. y Mattern, P. J. 1985. Hardness of winter wheats grown under widely different climatic conditions. *Cereal Chem.* 62:463 - 467.

Ponce-García, N., Figueroa-Cárdenas, J., López, G. A. H., Martínez, H. E. y Martínez, R. P. 2008. Study of viscoelastic properties of wheat kernels using compression load method. *Cereal Chem.* 85:667 - 672.

Robertson, G. H., Gregorsky, K. S. y Cao, T. K. 2006. Changes in secondary protein structure during mixing development of high absorption (90%) flour and water mixtures. *Cereal Chem.* 83:136 - 142.

Rodríguez, A. C. 2006. Empleo de microondas y energías no convencionales en los procesos de nixtamalización para la producción de harina, masa y tortilla in: I. M. P. I., Mexico.

Sapirstein, H. D., David, P., Preston, K. R. y Dexter, J. E. 2007. Durum wheat breadmaking quality: effects of gluten strength, protein, composition, semolina particle size and fermentation time. *J. of Cereal Sci.* 45:150 - 161.

SAS, I. 1999. SAS User's Guide, 8. Cary, NC, USA.

Sayyah, A. H. A. y Minaei, S. 2004. Behavior of wheat kernels under quasi-static loading and its relation to grain hardness. *J. of Agric. Sci. and Tech.* 6.

SECOFI. 1992. Norma Mexicana. Page 8 in: Alimentos - productos de panificación - clasificación y definiciones. Dirección General de Normas, México.

SECOFI. 1996. Norma mexicana. Page 16 in: Productos alimenticios no industrializados-cereales-trigo (*Triticum aestivum* L. y *Triticum durum* Desf.). Dirección General de Normas, México.

Shewry, P. R., Tatham, A. S., Forde, J., Kreis, M. y Mifflin, B. J. 1986. The classification and nomenclature of wheat gluten proteins: A Reassessment. *J. Cereal Sci.* 4:97-106.

Simmonds, D. H., Barlow, K. K. y Wrigley, C. W. 1973. The biochemical basis of grain hardness in wheat. *Cereal Chem.* 50:553 - 562.

Solís, E. M. y Ríos, S. A. R. 2007. El genotipo ideal de trigo para la labranza de conservación. P. Fundación Guanajuato, A.C., ed. INIFAP, Guanajuato, México.

Southan, M. y MacRitchie, F. 1999. Molecular Weight Distribution of Wheat Proteins. *Cereal Chem.* 76:827 - 836.

Sun, C., Berman, M., Coward, D. y Osborne, B. 2007. Thickness measurement and crease detection of wheat grains using stereo vision. *Pattern Recognition Letters* 28:1501 - 1508.

Sutton, K. H., Hay, R. L. y Mouat, C. H. 1992. The effect of kernel weight on the assessment of baking performance of wheats by RP-HPLC of glutenin subunits from single grains. *J. Cereal Sci.* 15:253 - 265.

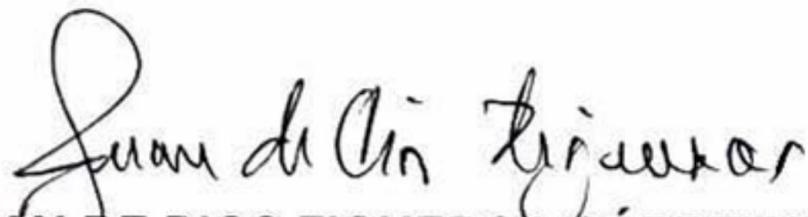
Thomas, D. J. y Atwell, W. A. 1997. *Starches*. AACC, St. Paul MN. USA.

Tkachuk, R., Dexter, J. E. y Tipples, K. H. 1990. Wheat fractionation on a specific gravity table. *J. Cereal Sci.* 11:213 - 223.

Weegels, P. L., Hamer, R. J. y Schofield, J. D. 1996. Critical review: functional properties of wheat glutenin. *J. Cereal Sci.* 23:1 - 8.

Zhao, S., Xiong, S., Qiu, C. y Xu, Y. 2007. Effect of microwaves on rice quality. *Journal of stored products research* 43:496 - 502.

EL JURADO DESIGNADO POR LA UNIDAD QUERÉTARO DEL CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y DE ESTUDIOS AVANZADOS DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL, APROBÓ LA TESIS DE MAESTRÍA DEL C. ZORBA JOSUÉ HERNÁNDEZ ESTRADA TITULADA: "EFECTO DE LA RADIACIÓN DE MICROONDAS EN LAS PROPIEDADES FÍSICO - QUÍMICAS Y ELÁSTICAS DEL GRANO DE TRIGO", FIRMAN AL CALCE DE COMÚN ACUERDO LOS INTEGRANTES DE DICHO JURADO, EN LA CIUDAD DE QUERÉTARO, QRO., A LOS VEINTIOCHO DÍAS DEL MES DE ENERO DE 2010



DR. JUAN DE DIOS FIGUEROA CÁRDENAS



DR. FERNANDO MARTÍNEZ BUSTOS



DR. J. GABRIEL LUNA BÁRCENAS

